

MINISTERE DES TRANSPORTS

DIRECTION GENERALE DES TRANSPORTS INTERIEURS

Direction des Routes et
de la Circulation Routiere

RAPPORT DU GROUPE DE TRAVAIL " AMENAGEMENT , ENTRETIEN , EXPLOITATION DES ROUTES ET CONSOMMATION D'ENERGIE "

Service des Affaires Etrangères

DOCU

CDAT

Réf. n°

3466

Membres du groupe Energie

M. MILLS	}	DRGR	Président
M. LAPLANCHE			RER
M. GIRARDOT			RER
M. GAUVIN			REV
M. SOUCHET			REV
M. BLANCHARD			RPR
M. PHILIPPE			REG.2.
M. LEVY	RIP.1.C. - Rapporteur		
M. MORELLET	}	SETRA	DLI
M. BOUZIGUES			DCT
M. TAMMAN			CETUR
M. LAMURE	}		IRT CERNE
M. ROUMEGOUX			
M. WORMS			SAE

GROUPE ENERGIE

Plan sommaire du rapport

O B J E T de l' E T U D E .-

I - <u>Consommations d'énergie dans le domaine routier</u>	p. 1
1) <u>Construction</u>	1
2) <u>Usage</u>	7
2-1- Consommations intrinsèques des véhicules	7
2-2- Effets des caractéristiques géométriques	8
2-3- Effets des conditions de circulation	16
2-4- Consommation du trafic (agrégation)	18
3) <u>Gestion</u>	23
3-1- Entretien	23
3-2- Exploitation	26
II - <u>Les enjeux énergétiques</u>	29
1) <u>Cadre général</u>	29
2) <u>Construction</u>	30
2-1- Bilan	30
2-2- Politique d'Economie	31
3) <u>Usage</u>	34
3-1- Bilan	34
3-2- Politique d'Economie	35
4) <u>Entretien et exploitation</u>	40
4-1- Bilan	40
4-2- Politique d'Economie	41
III - <u>Appréciation du bilan énergétique</u>	44
1) <u>Cadre général</u>	44
2) <u>Bilan énergétique des investissements</u>	47
2-1- Routes interurbaines	47
2-2- Milieu urbain	63

3) <u>Bilan énergétique Opérations d'exploitation</u>	63.
3-1- Routes interurbaines	63
3-2- Plans de circulation	65
4) <u>Bilan énergétique d'une politique libérale de Report Modal</u>	70.
5) <u>Bilan énergétique de l'Entretien</u>	72.
IV - <u>Applications pratiques</u>	73
1) <u>Calculs de rentabilité</u>	73
1-1- Valorisation du coût de l'énergie	73
1-2- Application aux opérations d'investissements	75
1-3- Application aux opérations d'Exploitation	76
2) <u>Recommandations pour l'élaboration des projets</u>	76
2-1- Plans de circulation	76
2-2 Report Modal	77
2-3- Eclairage	77
V - <u>Conclusions et suite à donner</u>	79

R A P P O R T

Objet de l'étude. -

Face au véritable défi que représente, pour l'économie nationale, l'hypothèque pesant sur ses importations pétrolières la réponse ou la tentative de réponse du domaine routier a jusqu'ici porté sur le véhicule.

La recherche d'économie énergétique a consisté à mettre au point des moteurs moins gourmands, à inciter les conducteurs à moins consommer grâce à une utilisation plus souple de leur véhicule ou, de façon plus autoritaire, à limiter les vitesses maximales autorisées. Parallèlement un effort a été engagé pour rendre opérationnelles d'autres sources d'énergies motrices que le pétrole.

La consommation des véhicules routiers représentent en effet, non seulement une part importante des importations d'hydrocarbures, mais cette part est très difficilement substituable : il est donc parfaitement légitime de se préoccuper au premier chef de ce poste.

Cependant le véhicule et sa consommation ne peuvent être complètement dissociés de l'infrastructure empruntée et des conditions de circulation rencontrées.

C'est à une prise en compte plus exhaustive du facteur énergie dans le domaine routier que s'est consacré le Groupe de Travail Energie.

Le présent rapport, qui reprend les résultats des réflexions du Groupe, s'est d'abord efforcé d'estimer aussi exactement que possible les différentes consommations énergétiques misés en jeu par chaque activité élémentaire liée à la route (construction, usage, gestion). Il fait ressortir dans un deuxième temps les grandes masses en présence et l'évolution que pourraient leur imprimer les différentes politiques d'économie d'énergie envisageables.

Une telle analyse permet ensuite de porter une appréciation sur l'intérêt énergétique des projets routiers, et de dégager les orientations propres à la recherche d'économie d'énergie sur le choix d'opérations, dont la rentabilité économique, telle qu'elle est appréhendée aujourd'hui, intégrerait également des critères d'économie d'énergie.

I. - Les consommations d'énergie dans le domaine routier. -

Bien qu'on s'attache d'ordinaire à ne considérer les consommations d'énergie liées à la route que du seul point de vue des dépenses en carburants du trafic qu'elle écoule, d'autres activités routières dépendent de l'énergie et en premier lieu la construction.

Il s'agit donc de recenser les différentes dépenses énergétiques unitaires mises en jeu.

Comme, d'autre part, ces différentes dépenses ne sont pas indépendantes entre elles et qu'elles varient en fonction de paramètres intrinsèques ou extrinsèques au domaine routier, nous devons mettre en évidence les lois qui régissent les variations de chaque consommation.

A partir de l'évaluation de chaque dépense énergétique unitaire, une première agrégation devra être enfin testée pour les différents types d'aménagements ou de circulation envisagés.

I. - 1) - CONSTRUCTION -

I. - 1) - 1 - CONSOMMATIONS UNITAIRES -

Trois postes sont, à la construction les principaux consommateurs d'énergie. Ce sont :

- les chaussées
- les terrassements
- les ouvrages d'art.

La constitution et la mise en place des matériaux constitutifs de chaussées requièrent différents besoins énergétiques au niveau de la fabrication des matériaux stabilisés (électricité - fuel lourd) et du transport (gaz oil et fuel domestique).

Elles requièrent également, une matière première qui ne peut pas être négligée dans le bilan : il s'agit du bitume.

Le bitume est en effet un constituant à part entière du pétrole importé.

Mais, selon les hypothèses d'évolution de l'offre pétrolière (la part des bruts "lourds" devant vraisemblablement augmenter), de la demande (proportion croissante de la consommation de produits légers pouvant rendre opportun le recours au craquage du bitume mais accroissant la part des résidus lourds) et enfin du coût (pouvant rendre le craquage économiquement rentable), il est loisible de considérer le bitume comme un sous produit du pétrole dont la quantité risque d'être, à terme, surabondante même dans des scénarios de crise pour les produits légers, ou au contraire comme un produit énergétique que l'évolution du marché peut rendre aussi précieux que les distillats combustibles.

Compte tenu de la spécificité propre qui s'attache donc au bitume, nous avons retenu une double présentation qui met en évidence le bilan énergétique de la construction routière, d'une part avec, d'autre part sans bitume.

Les terrassements demandent l'énergie dépensée par les engins de terrassement et de matériaux.

Les ouvrages d'art nécessitent principalement un apport d'énergie pour la fabrication du béton et des aciers qui les constituent.

Les valeurs unitaires dont le tableau ci-après donne le détail sont des valeurs moyennes qui reflètent des conditions normales de chantier. Elles devront être prises comme telles. Dans des cas trop différents de ces conditions (terrassements exceptionnels, transports importants, conditions spécifiques de chantier....) un calcul particulier pourra être fait.

I. - 1 - 2) AGREGATION -

Il est facile d'agréger les consommations unitaires des différents postes de la construction routière en établissant un "détail estimatif" en termes énergétiques à partir de l'avant-métré d'un projet.

On peut ainsi mettre en évidence, pour un certain nombre d'aménagements - type, le bilan énergétique de la construction (Tableau n°2).

Il apparaît que les consommations varient naturellement avec le type d'aménagement retenu, et avec les caractéristiques géométriques d'un type d'aménagement donné. Ainsi une diminution de la vitesse de référence entraîne, sur le plan de la construction de l'infrastructure, des économies d'énergie. L'étude des variantes en termes économiques peut donc être étendue, grâce à ces résultats en termes d'énergie.

I. - 1. 5)

Le tableau n°1 est directement utilisable pour calculer l'équivalence énergétique de la construction des projets pour lesquels un avant métré est établi.

Sinon on peut se reporter à titre d'évaluation sommaire au tableau n°2

Pour fixer les idées, on peut retenir que l'équivalence énergétique de la construction d'un kilomètre d'autoroute (750 Tep) représente la consommation d'un trafic de 10 000 véh /j pendant quatre/ans sur le kilomètre en question.

Tableau 1

Valeurs Unitaires

Crausées. -

Matériaux ou Travaux	Unité	Equivalence énergétique Hors bitume			TOTAL hors bitume	Equivalence énergétique bitume	TOTAL GÉNÉRAL
		Electricité	Gazole et fuel domesti- que	Fuel lourd			
bitumeux	10 ⁻⁴ TEP/t	9,5	46,5	71,5	127,5	522,5	650
-laitier	10 ⁻⁴ TEP/t	8,0	42,0	10,0	60		60
-bitume	10 ⁻⁴ TEP/t	5,8	43,7	68,0	117,5	332,5	450
-ciment	10 ⁻⁴ TEP/t	5,4	47,6	32,0	85		85
-cendres volantes Bardanne	10 ⁻⁴ TEP/t	6,5	45,5		52		52
-cendres Monte du Nord	10 ⁻⁴ TEP/t	7,3	45,7	30,0	83		83
-pouzzolane aux	10 ⁻⁴ TEP/t	4,9	48,1	30,0	83		83
-ciment	10 ⁻⁴ TEP/t	4,8	47,8	127,4	180		180
-maigre	10 ⁻⁴ TEP/t	5,2	46,6	68,2	120		120
-type non traitée	10 ⁻⁴ TEP/t	6,0	26,0		32		32
-bit bicouche à pulsion	10 ⁻⁴ TEP/m ²		2,0		2	15	17
-bit ou bitume axé	10 ⁻⁴ TEP/m ²		2,0		2	12	14
-ttement de sol ciment	10 ⁻⁴ TEP/m ³ / (point de ciment)		3,5	15,5	19		19
-ttement de sol à chaux	10 ⁻⁴ TEP/m ³ / (point de chaux)		4,0	17,0	21		21

Terrassements. -

-sais	10 ⁻⁴ TEP/m ³		5,0		5		5
-sais	10 ⁻⁴ TEP/m ³		4,0		4		4
-port de terre	10 ⁻⁴ TEP/m ³		3,0		3		3

Travaux d'art. -

	10 ⁻⁴ TEP/m ³				400		400
	10 ⁻⁴ TEP/t				6000		6000

Cassières de Sécurité. -

-sière simple	10 ⁻⁴ TEP/m				120		120
					200		200

Tableau 2
Consommation par type d'aménagement

Type d'aménagement	Terrassements	Chaussées B.B.	Ouvrages d'art	Glissières	TOTAL
Un kilomètre d'autoroute à 2 x 2 v (plate-forme de 27 m)	100 000 m ³ soit 100 TEP	16 000 m ² soit 270 à 800 TEP	600 m ² soit 30 TEP	2 000 m double soit 40 TEP	de 420 à 970 TEP
Un kilomètre de route à 2 x 2 v (plate-forme de 23,5	50 000 m ³ soit 50 TEP	16 000 m ² soit 270 à 800 TEP	300 m ² soit 15 TEP	1 000 m simple soit 12 TEP	de 350 à 877 TEP
Un kilomètre de route de 10,5 m (plate-forme de 16,5 m)	20 000 m ³ soit 20 TEP	12 000 m ² soit 200 à 600 TEP	150 m ² soit 7,5 TEP	1 000 m simple soit 12 TEP	de 230 à 640 TEP
Un kilomètre de route de 7m (plate-forme de 12,5 m)	15 000 m ³ soit 15 TEP	8 000 m ² soit 140 à 400 TEP	100 m ² soit 5 TEP	-	de 160 à 420 TEP
Dénivellation de carrefour (losange)	100 000 m ³ soit 100 TEP	12 500 m ² soit 450 TEP	500 m ² soit 25 TEP	200 m simple soit 2,5 TEP	580 TEP

I - 2 - L'usage des infrastructures.

1.2.1 - Consommations intrinsèques des véhicules.

Tout véhicule automobile doit, pour se déplacer, vaincre un certain nombre de forces qui dans le cas de pentes nulles et de sections droites et d'absence de gênes dues au trafic, dépendent en grande partie des caractéristiques propres de véhicule - résistance au roulement, résistance aérodynamique, inertie.

Un véhicule donné est donc caractérisé par une consommation intrinsèque, qui ne dépend que de sa vitesse.

a) Pour le véhicule léger.

Ces courbes sont très bien connues puisque établies systématiquement par les constructeurs aussi bien pour les Véhicules Particuliers que pour les Poids Lourds. Elles sont, dans le domaine des vitesses pratiquées en Rase-Campagne (60-120 km/h) { la partie des courbes correspondant aux vitesses urbaines est peu intéressante car la vitesse n'est jamais stabilisée en milieu urbain et les phénomènes extérieurs aux véhicules prédominent largement } de la forme
$$C = a_0 \left(\frac{V}{100} \right)^2 + b_0$$

Nous considérons que cette relation est valable non seulement à vitesse rigoureusement stabilisée mais également pour les vitesses moyennes pratiquées sur route libre dans la mesure où les variations d'allure constatées sont en général faibles.

La connaissance exacte de la valeur de la consommation intrinsèque d'un véhicule donné serait suffisante pour apprécier le bilan énergétique hors effet de l'infrastructure, ou plus généralement de l'environnement du véhicule, si deux facteurs de dispersion ne venaient rendre ces résultats moins réalistes.

Ce sont d'une part le style de conduite du conducteur et d'autre part l'état de réglage mécanique du véhicule.

Il est incontestable que les actions d'ores et déjà menées pour améliorer la situation dans chacun de ces domaines sont intéressantes et que l'enjeu énergétique en est certain. La valorisation précise de cet enjeu est plus délicate, et seule une enquête vaste et précise serait de nature à en déterminer l'ampleur.

Il faut ajouter l'emploi ou l'existence d'accessoires dont l'influence sur la consommation est loin d'être négligeable :

- Usage des équipements auxiliaires de sécurité ou de confort (projecteurs, feux de signalisation, essuie glace, climatisation, lunette arrière chauffante....).

- Utilisation du starter lors des démarrages à froid.

- Modifications de l'aérodynamisme ou de la charge du véhicule (adjonction des galeries de toit, répartition des charges à l'intérieur du véhicule, tractage de remorques ou de caravanes).

Nous ferons l'hypothèse "optimiste", tenant compte d'une prise de conscience par les conducteurs de la nécessité d'une conduite "coulée" et d'un meilleur réglage de leur véhicule (favorisé sans doute également par l'évolution de la technologie qui pourra rendre les moteurs moins déréglables), que la consommation intrinsèque réelle des véhicules est ^{en} moyenne supérieure de 10% à la consommation théorique.

b) Pour le Poids Lourd. -

On a de même la relation

$$C = a \left(\frac{V}{100} \right)^2 + b + \frac{d}{V}$$

$$\left[C \text{ en } 1/100 \text{ km} , V \text{ en km/h} \right]$$

I. - 2 - 2 -- Effets des caractéristiques géométriques. -

La consommation intrinsèque des véhicules, qui suppose que le déplacement a lieu sur une route droite et en palier, ne peut suffire à rendre compte des consommations qu'entraîne dans la réalité l'énergie dépensée pour vaincre les forces de pesanteur dans les pentes, ou les forces résistives s'opposant à la giration des véhicules dans les courbes.

L'influence des caractéristiques géométriques de la route sur les consommations doit donc être étudiée, si l'on veut apprécier de façon réaliste la dépense énergétique de la circulation routière sur une infrastructure qui n'est en fait ni entièrement droite ni entièrement plate.

Les résultats qui suivent ont été mis en évidence par l'I.R.T. - C.E.R.N.E. qui, à notre demande, a effectué, pour une série de véhicules légers représentatifs de chaque gamme du parc français, plusieurs campagnes de mesures "in situ", des essais sur aire plane de véhicules en trajectoire circulaire, et a conforté les résultats mis en évidence par une approche théorique.

Pour les Poids Lourds, dont le comportement face aux contraintes de la route semble radicalement différent de celui des véhicules légers, on a utilisé en particulier les résultats donnés par le programme SIMAVERO développé par RENAULT Véhicules Industriels.

a) Influence de la pente sur les véhicules légers.

Il apparaît que l'influence moyenne des pentes n'est sensible qu'au-delà d'une certaine valeur.

En effet jusqu'à 4% la consommation pour une vitesse donnée peut s'écrire $C = C_0 + Kp$, p étant considérée en valeur algébrique. Or, sauf cas exceptionnel (le trafic routier allant du point A au point B, étant égal au trafic de B en A), l'effet résultant de la dénivellation de ces deux points sera nul (même si les routes sont différentes à l'aller et au retour) à distances égales.

Les pentes plus importantes interviennent au contraire en valeur absolue et ont une incidence sur la consommation d'un véhicule léger. Bien que des études plus précises soient faites pour déterminer la loi qui régit la consommation en fonction des fortes pentes, on peut faire l'approximation qu'il s'agit d'une loi linéaire de la forme.

$$c = c_0 + 0,28 (p - 4) \quad \text{pour } 4\% \leq p \leq 7\% \text{ c } 1/100 \text{ km}$$

$$c = c_0 + 0,84 (p - 6) \quad 7\% \leq p \leq 10,5\% \text{ c } \text{consommation pour } p = 0$$

Les relations sont valables pour un véhicule R.12 que nous considérons en première approximation représentatif de la voiture moyenne du Parc.

En conclusion l'influence de la pente ^{est} nulle en moyenne pour les véhicules légers jusqu'à 4%.

Pour des pentes supérieures on prendra en compte une surconsommation égale à :

0,28 (p - 4) pour p comprise entre 4 et 7%

et 0,84 (p - 6) pour p comprise entre 7 et 10,5%

b) Influence de la sinuosité sur les véhicules légers

Il convient de distinguer, en ce qui concerne l'effet de la sinuosité sur les V.L. deux catégories de virages:

- les virages à grand rayon de courbure qui ne conduisent pas à une modification de la vitesse des véhicules mais qui mettent en jeu des forces centrifuges.

- les virages à faible rayon qui entraînent une modification de la cinématique.

L'analyse expérimentale et théorique a permis d'avancer que la consommation était de la forme

$$c = a \left(\frac{V}{100} \right)^2 + b$$

$$a = a_0 + \lambda_1 \bar{n} + \lambda_2 \sum \alpha$$

$$b = b_0 (1 - n\bar{l}) - \lambda_3 n\bar{r}$$

où a_0 , b_0 sont les valeurs des paramètres déterminant la consommation intrinsèque du véhicule (route rectiligne et horizontale)

$\sum \alpha$ la somme des angles des virages à grand rayon exprimée en radians pour 1 km

n le nombre de virages à faible rayon par km

\bar{l} et \bar{r} la longueur et le rayon moyens des virages de faible rayon exprimés en km.

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ constantes proportionnelles à la masse du véhicule. Sont considérées comme virages à faible rayon les courbes de rayon inférieur à $\frac{V_0}{\gamma_0}$ $\gamma_0 = 0,25$

On retiendra l'expression suivante :

$R_c = \frac{V_0^2}{32}$ où V_0 est la vitesse moyenne sur le parcours en Km/h pour un véhicule isolé et R_c est exprimé en m.

Valeurs des paramètres pour les différentes voitures représentatives du Parc :

masse	Type	a_0	b_0 route	b_0 autoroute	λ_1	λ_2	λ_3
890 kg	R.5	4,1	3	3,1	2,67	0,35	8,36
1 T	R.12	4,1	4,6	4	3	0,4	9,4
1300 kg	504	4,1	5,4	4,8	3,9	0,52	12,2

On pourra retenir l'exemple suivant pour se fixer les idées : l'influence de la sinuosité sur un véhicule isolé est loin d'être négligeable, puisque la consommation diminue lorsque la sinuosité devient moins forte, bien que la vitesse moyenne augmente.

sinuosité	vitesse moyenne	consommation
Forte	65	7,8 L/100 km
moyenne	73	7,5L /100 km
nulle	85	7L /100 km

c) Influence de la pente sur le Poids Lourds. -

L'analyse des surconsommations des Poids Lourds dues aux caractéristiques de la route (pente et sinuosité) s'avère plus délicate encore qu'en ce qui concerne les V.L.

L'effet "remise en vitesse" est sans aucun doute un phénomène à ne pas négliger et on conçoit qu'il dépende beaucoup du type de véhicule, de sa vitesse de croisière, de la vitesse minimale dans la pente, de sa charge autant de facteurs très variables.

De plus, alors que pour les V.L. les vitesses en montées et en descentes peuvent être considérées comme équivalentes, le Poids Lourds est évidemment très ralenti en montée et accéléré en descente à un point tel, qu'au dessus d'une certaine pente, le couple de retenue moteur n'étant plus suffisant, le véhicule est obligé de freiner et que sa consommation est nulle.

L'analyse développée par SIMAVERO et l'I.R.T. prend en compte les éléments suivants :

- valeur de la pente p
- type de véhicule
- charge du véhicule vide ou plein
- vitesse d'entrée dans la rampe
- vitesse stabilisée dans la rampe
- longueur de la rampe L

Elle met en évidence une valeur limite de longueur de rampe, qui dépend du véhicule, de la longueur et de

la vitesse d'entrée, au-dessous de laquelle la consommation est peu sensible à la pente. Elle dégage également des valeurs de pentes limites au dessous desquelles (en valeur absolue) les consommations montée descente se compensent (hors surconsommation dues aux remises en vitesse) à vitesse égale : ces valeurs dépendent également du type et de la vitesse du véhicule considéré.

Force est, pour une utilisation courante, de trouver un modèle simplifié donnant des relations moyennes.

En considérant, un véhicule "moyen" correspondant à une composition de Parc donnée ci-dessous :

P.T.C.	3,5 T	6 T	13 T	19 T	38 T
Pourcentage	25	9	8	19	39

que 30% du parcours en véhicules-km sont effectués à vide, que tous ces P.L. circulent à la même vitesse et que les valeurs limite de pente sont indépendantes de la vitesse,

On peut mettre en évidence la relation suivante :

$$C = 23,7 \left(\frac{V}{100} \right)^2 + 3,8 + \frac{636}{V} + \frac{100}{L} \cdot 4 \cdot 10^{-5} n (V^2 - v_p^2) + \Delta C$$

$$\text{avec } \Delta C = 0 \quad p \leq 1,5\%$$

$$\Delta C = \frac{11}{100} 3,4 (p - 1,5) \quad 1,5\% \leq p \leq 2,5\%$$

$$\Delta C = \frac{l_2}{100} \left[3,4 + 4,6 (p - 2,5) \right] \quad 2,5\% \leq p \leq 4\%$$

$$\Delta C = \frac{l_3}{100} \left[10,3 + 5,2 (p - 4) \right] \quad p \geq 4\%$$

C en l/100 km

V_p en km/h - vitesse stabilisée dans la pente

V en km/h - vitesse stabilisée de "croisière"

L longueur de la pente

p valeur de la pente moyenne

l_1 l_2 l_3 longueur des pentes dans chaque catégorie

n nombre de rampes

d) Influence de la sinuosité sur la consommation des Poids Lourds. -

Une théorie et des simulations ont été effectuées comme pour les V.L.

On a négligé l'influence des virages à grand rayon

$$\bar{R} > \frac{V_o^2}{32} \quad V_o \text{ vitesse moyenne P.L isolé en km/h}$$

On obtient une expression de la forme

$$C = a \left(\frac{V}{100} \right)^2 + b + \frac{d_o}{V}$$

Avec $a = a_o + n\alpha$

$$b = b_o + n\beta - n\gamma \frac{R}{40}$$

où a_o , b_o , d_o sont les coefficients correspondants à la consommation sur route rectiligne et plane

n est le nombre de virages à petit rayon (inférieur à $\frac{V_o^2}{32}$), R le rayon moyen en m.

α , β , γ des coefficients dépendant du véhicule et de sa charge et sensiblement proportionnels à sa masse.

Dans les hypothèses de composition moyenne du Parc P.L.

on a

$$C = (a_o + n\alpha) \left(\frac{V}{100} \right)^2 + b_o + n\beta - n\gamma \frac{R}{40} + \frac{d_o}{V}$$

avec $a_o = 23,7$ $b_o = 3,8$ $d_o = 636$

$\alpha = 28,8$ $\beta = 3,6$ $\gamma = 4,6$

n nombre de virages à rayon inférieur à $\frac{V_o^2}{32}$

R rayon moyen de ces virages en m.

il s'avère que les pentes ont une influence très important

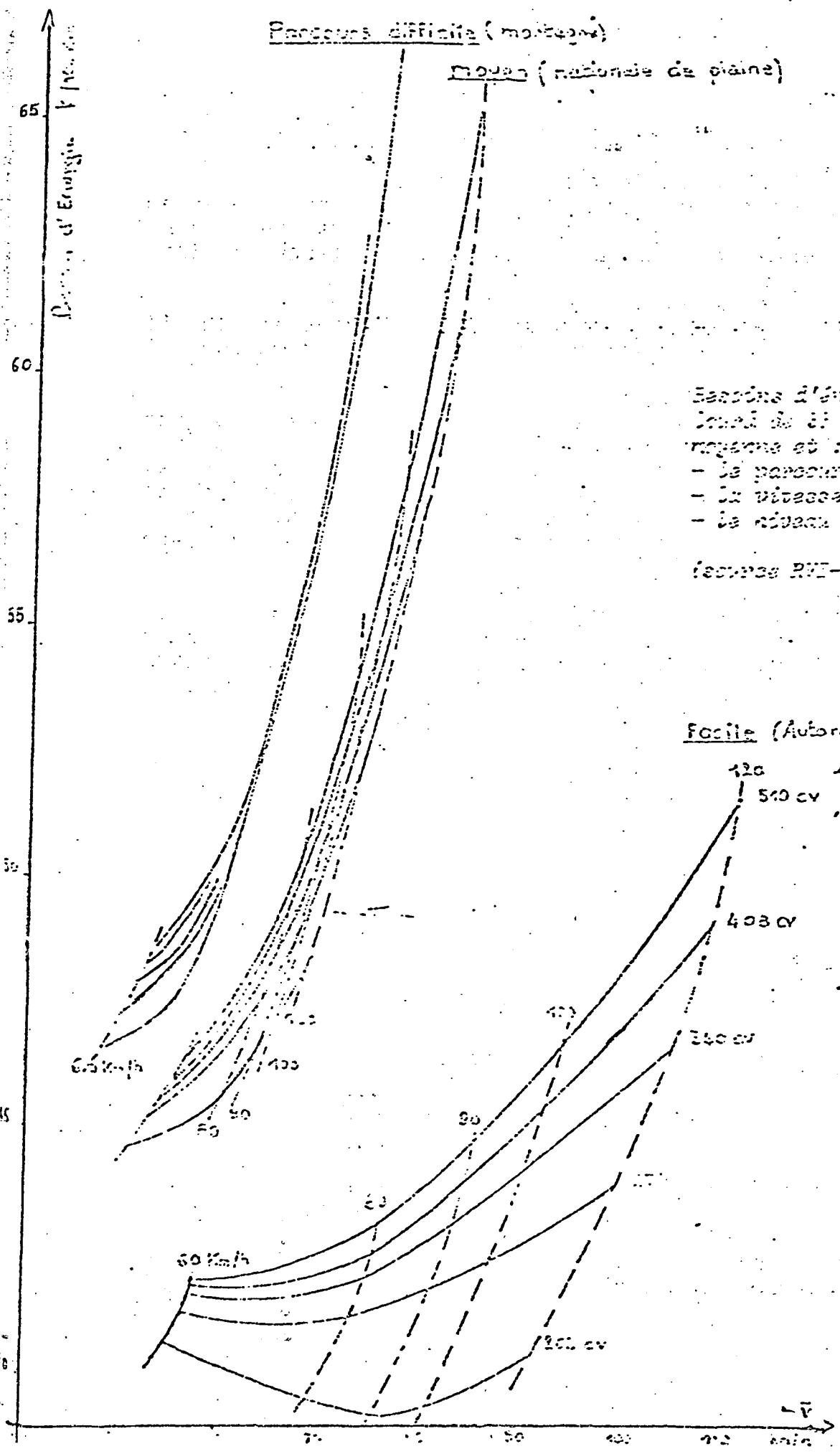
Les courbes ci-jointes (Tableau III) représentent, en fonction de différents types de parcours, les consommations de 38 T de P.T.R. diversement motorisés. Il ne s'agit pas, précisons-le, du Poids Lourd représentatif du parc qui se situe autour de 20T de P.T.R.

La vitesse étant supposée limitée à 90 km/h on obtient, pour ce même véhicule de 304 ch le bilan suivant

	vitesse moyenne	consommation
autoroute	82	42,5 L/100
route plaine	68	50 L/100
route de montagne	63	52,1 L/100

* pour l'ensemble des caractéristiques.

Parcours difficile (montagne)
Moyen (nationale de plaine)



Essais d'énergie pour un poids total de 21 t. selon la vitesse moyenne et :

- le parcours emprunté
- la vitesse maximum de roulage
- le niveau de puissance installé

(source RVI-BERLIET ATP 70051)

Facile (Autoroute)

120
540 cv

490 cv

250 cv

200 cv

60 km/h

60 km/h

70 80 90 100 110 120 km/h

Consommation d'Énergie (l/100 km)

V

I - 2.3. - Effets des conditions de circulation . -

Les consommations mises en évidence jusqu'ici concernaient, pour le cas du véhicule léger en particulier, des véhicules dont seules les caractéristiques géométriques de la route étaient susceptibles de faire varier la vitesse.

De telles conditions ne sauraient rendre compte de l'ensemble des situations rencontrées sur le réseau, en particulier des cas de trafic non fluide et des phénomènes du milieu urbain.

L'effet de la densification et de la saturation progressive de l'infrastructure sur les consommations est d'autant plus délicat à modéliser, que les phénomènes se concrétisent de façon très diverse : réduction régulière de la vitesse, écoulement en accordéon, avancement au pas, stop and go, immobilisation prolongée Les situations urbaines sont, quant à elles tellement spécifiques, que seules des études particulières semblent adaptées.

Nous nous efforcerons par une première approche de déterminer les ordres de grandeur des consommations en jeu. Il reste entendu que dans ce domaine plus encore que pour les consommations en circulation fluide, des études plus approfondies restent sans aucun doute nécessaires.

Ne seront abordées ici que les consommations V.L. On considérera qu'en situation non fluide les Poids Lourds déterminent la vitesse du flot et que l'expression de la consommation donnée en I.2.2. reste valable.

Les résultats des expérimentations menées, qui restent, rappelons-le, assez sommaires, ont conduit à distinguer deux modèles pour rendre compte d'une part de la consommation en trafic non fluide hors agglomération urbaine, d'autre part des consommations en milieu urbain.

a) Circulation non fluide

sur route. - Il semble cohérent d'exprimer la consommation sous la forme $a + \frac{b}{V}$ pour des vitesses inférieures à 70 km/h sur routes de rase campagne et dans les traverses d'agglomérations petites ou moyennes.

Cette relation paraît représentative des consommations en bouchons.

sur autoroutes. - Bien que les phénomènes soient différents, on adoptera la même formule en relevant toutefois la vitesse limitée à 80 km/h.

On prendra en définitive les coefficients suivants.

$$C = a + \frac{b}{V} \quad V < 70 \text{ km/h route - autoroute}$$

C en L./100 km

V en Km/h

	R.5	R.12	Peugeot .504	Valeur moyenne route	Valeur moyenne autoroute
a	3	4,2	6,3	4,2	4,4
b	165	113	153	137	136

Le recueil des données concernant les bouchons ne se fait pas en termes de vitesses moyennes mais de h x véhicules des consommations en bouchons en l/h.

La formule ci-dessus appliquée à des valeurs minimales de la vitesse donne, en moyenne, des consommations de 2,5 L/h sur route et 2,8 l/h sur autoroute. (consommation correspondant à 25 km/h) et différent par les compositions de trafic différentes

b) Consommation en agglomération importante. -

Alors que le domaine d'application de la formule précédente s'étendait aux traversées d'agglomérations petites ou moyennes, caractérisées certes par la taille limitée mais aussi par un type de voirie adaptée au trafic de transit, on se propose d'étudier les déplacements spécifiquement urbains dans les agglomérations importantes.

L'I.R.T. a commencé dans cette perspective pour des parcours représentatifs des parcours urbains tant à PARIS que dans quelques grandes villes de Province (TOULOUSE - NICE - DUNKERQUE) une analyse "in situ" de la surconsommation et de ses facteurs explicatifs.

Une relation moyenne a été exprimée pour une R.12 sous la forme

$$C = 6,52 + \frac{99,5}{V} \quad C \text{ en litres au } 100 \text{ km}$$

V vitesse moyenne en km/h étant supposée comprise entre 10 et 60 km/h.

Les coefficients numériques établis pour la R.12 seraient, en première approximation, pour d'autres véhicules, proportionnels à la masse (en ce qui concerne le terme constant) et à la consommation au ralenti, donc à la cylindrée, pour le terme en $1/v$.

Cette expression ne tient pas compte de l'influence du style de conduite (10%) et suppose le moteur chaud.

Ce modèle devra donc d'une part être complété par des mesures sur d'autres véhicules représentatifs (campagne en cours) et d'autre part précisé dans la mesure où certains paramètres ne sont pas pris en compte.

Il pourra cependant être utilisé en première approximation. Il reste également à déterminer, ce qui est essentiel pour l'appréciation de l'intérêt énergétique des opérations ponctuelles en milieu urbain, l'influence particulière sur la consommation d'un carrefour à feux, d'une trémie...

Des voies de recherches sont ouvertes dans ces domaines.

I - 2 - 4. - Consommation du trafic (agrégation). -

Les consommations unitaires déterminées, ou supposées telles, aux paragraphes I.2.1. I. 2. 2. et I. 2. 3. doivent être agrégées au niveau d'un parcours pour tenir compte des différentes contraintes externes ou internes qui agissent sur elles, et multipliées par le trafic supporté immédiatement ou à terme par l'infrastructure.

Il convient tout d'abord de définir le véhicule moyen pris comme unité.

Ce véhicule est, on le sait, différent sur route et sur autoroute, puisque la répartition des cylindrées est différente sur ces deux infrastructures.

L'enquête I.N.S.E.E. 74 indiquant par ailleurs que le kilométrage de chaque gamme est à peu près équivalent en milieu urbain, nous considérerons que la répartition du Parc français est représentative de la composition du trafic en ville

	autoroute	route nationale	Parc français ville
Bas de gamme 6 cv	28,4 %	37,3 %	32 %
gamme moyenne	50,5 %	50,7 %	58 %
Haut de gamme 10 cv	21,1 %	12 %	10 %
	Enquête O.N.S.E.R. 76-79		

Il conviendra de prendre à partir des trois véhicules représentatifs de chaque gamme (R.5 TL, R.12 TL, 504 TL) une pondération proportionnelle à ces compositions dans chaque cas.

En milieu urbain on considère qu'est représentative la consommation pour la R.12, l'agrégation étant faite ultérieurement lorsque les mesures sur R.5 et 504 auront été dépouillées.

Pour le Poids Lourd le modèle, compte tenu de sa complexité, a intégré dès la première étape une composition - type du parc

Sur ces bases le calcul de la consommation totale sur une infrastructure existante ou projetée se déroule de la façon suivante :

a) Isoler les sections homogènes selon la procédure préconisée dans la circulaire de 1974.

b) Déterminer les caractéristiques géométriques de la route :

- longueur des pentes et pente moyenne : on distinguera les pentes inférieures à 1,5 % celles comprises entre 1,5 et 2,5 %, 2,5 et 4 %, 4 et 7 % et enfin celles supérieures à 7% et on déterminera à l'intérieur de chacune de ces classes une pente moyenne et leur longueur.

- virages à grand rayon $[\Sigma \alpha]$

- virages à petit rayon n, \bar{l}, \bar{r}

c) Détermination de l'état de la circulation et de son influence sur la consommation.

On ne pourra utiliser, en l'absence d'études, que les statistiques de bouchons pour estimer la saturation.

d) Calcul des Consommations unitaires moyennes. -

* Voitures Légères Interurbain - fluide -

$$C = \frac{l_1 \times 1,1}{100} \left[a \left(\frac{V}{100} \right)^2 + b \right] + 0,31 \frac{l_4}{100} (\bar{p}_4 - 4) + 0,92 \frac{l_7}{100} (\bar{p}_7 - 6)$$

où C consommation en litres sur le parcours

l_1 longueur de la section en Km

V vitesse moyenne Km/h

$$a = a_0 + \lambda_1 n + \lambda_2 \sum \alpha$$

$$b = b_0 (1 - n\bar{l}) - \lambda_3 n\bar{r}$$

l_4 longueur des pentes comprises entre 4 et 7% en Km

\bar{p}_4 pente moyenne dans la classe de 4 à 7%

l_7 longueur des pentes supérieures à 7% en Km

\bar{p}_7 pente moyenne dans la classe supérieure à 7%

	a_0	b_0	λ_1	λ_2	λ_3
route	4,1	3,9	3	0,4	9,4
autoroute	4,1	3,7	3,1	0,41	9,7

$\sum \alpha$ somme en radians par km des virages de rayon supérieur à $\frac{V_0^2}{32}$ (V vitesse moyenne en km/h)

n l r, nombre, par km, longueur et rayon moyen des virages de rayon inférieur à $\frac{V_0^2}{32}$ exprimés en km.

* Voitures légères trafic non fluide et traversées d'agglomérations

$$C = \frac{1,1 \times L}{100} \times \left[42 + \frac{137}{V} \right] \quad V \text{ en Km/h}$$

* Véhicules légers - Urbain -

$$C = \frac{1,1 L}{100} \left[6,52 + \frac{99,5}{V} \right]$$

* Poids Lourds. -

$$C = \frac{L}{100} \left[a \left(\frac{V}{100} \right)^2 + b + \frac{d}{V} \right] + \frac{3,4 l_1}{100} (\bar{p}_1 - 1,5) + \frac{l_2}{100} \left[3,4 + 4,6 (\bar{p}_2 - 2,5) \right]$$

$$+ \frac{l_3}{100} \left[10,3 + 5,2 (\bar{p}_3 - 4) \right] + 4 \cdot 10^{-5} \sum_{i=1}^m (V_i^2 - V_{PL}^2)$$

L Longueur de la section

l_1 l_2 l_3 , \bar{p}_1 , \bar{p}_2 , \bar{p}_3 longueur et valeurs moyennes des pentes respectivement comprises entre 1,5 et 2,5 %, 2,5 % et 4 % et supérieures à 4 %

m nombre de rampe

V_i vitesse moyenne en km/h

V_{PL} vitesse moyenne en rampe

$$a = 23,7 + n' \times 28,8$$

$$b = 3,8 + 3,6 n' - 0,115 R n'$$

$$d = 636$$

où n' et R sont le nombre et le rayon moyen des virages de rayon inférieurs à $\frac{V_0^2}{32}$ (V_0 vitesse moyenne du poids lourds en km/h) exprimé en m.

e) Multiplier les consommations unitaires par les trafics VL et PL.

Le trafic annuel est, pour les infrastructures existantes, parfaitement connu par les comptages. Sa croissance, sauf cas exceptionnel, sera celle qui est définie dans la circulaire de 1974.

En ce qui concerne les prévisions de trafic pour les projets, on se heurte au problème de l'induction de trafic, donc de dépenses énergétiques, si l'on veut apprécier en toute équité le bilan des consommations avant et après.

La D.R.C.R. (SETRA) et le S.A.E. ont observé par l'enquête PARIS-METZ que la moitié de l'induction constatée sur A.4 était constituée de reports venant d'autres modes, essentiellement du train.

La consommation de l'autre moitié du trafic induit remplace, quant à elle, d'autres consommations énergétiques qui ne sont pas négligeables.

On suppose, faute d'éléments d'appréciation autres, que ces consommations se distribuent linéairement de 0 à la consommation énergétique du véhicule routier ramené au passager.

Cela implique que soit comptée à l'actif du bilan des consommations énergétiques imputables à la circulation une quantité égale à :

$$C_i = \frac{nc_r}{2} i_t + \frac{c}{4} i_t$$

où i_t est le trafic induit

c la consommation unitaire du véhicule moyen

c_r la consommation par passager du chemin de fer

n le taux d'occupation moyen des véhicules

en moyenne on prendra $nc_r = \frac{c}{2}$

$$\text{d'où } C_i \approx \frac{it c}{2}$$

Il est évident que ce calcul sera, dans la pratique relativement long et fastidieux, tel qu'il est exposé et alors qu'il n'intrègre pas tous les paramètres significatifs (en particulier la circulation)

Aussi semble-t-il du plus haut intérêt de développer un programme informatique qui, à l'instar de ce qui est réalisé pour les Poids Lourds (SIMAVERO qui pourrait d'ailleurs être utilisé directement pour les besoins du calcul, avec l'accord du propriétaire), permettrait de calculer sans intermédiaire la consommation des véhicules légers compte tenu du profil de la route et des contraintes de toute nature qui limitent ou font varier la vitesse.

3. - Gestion (Entretien et Exploitation) de l'infrastructure

Les dépenses énergétiques, qu'entraîne la gestion du réseau, ne doivent pas être négligées dans le bilan que nous entreprenons.

Il est en effet certain que les tâches d'entretien des routes nationales représentent une part importante de l'activité liée à la route et qu'elles mettent en jeu pour beaucoup le bitume que nous avons intégré dans les produits énergétiques.

3. 1. l'Entretien. -

Les différentes tâches d'entretien concernent :

- les chaussées
- les dépendances
- les ouvrages d'art
- la signalisation
- le service hivernal

Parmi celles-ci, seule la première fera l'objet de développement. En effet, les consommations énergétiques des tâches d'entretien autres que celles relatives aux chaussées sont très faibles en regard de celles de cette dernière. De plus, pour elles il n'existe pas à l'heure actuelle de solutions alternatives qui permettraient de rechercher efficacement les économies d'énergie.

- Consommations énergétiques des différents postes d'entretien des chaussées.

Les consommations énergétiques correspondantes sont données au chapitre I § 1 "Construction" où le tableau I regroupe les consommations des différents postes pouvant concerner la construction des chaussées neuves. Cependant, comme il n'existe pas de différence sensible entre les techniques mises en oeuvre selon qu'elles s'appliquent à la construction de chaussées neuves ou à l'entretien des chaussées, les chiffres du tableau I pour ront donc être utilisés.

Comme dans le cas de la construction, des calculs pourront être effectués selon les mêmes modalités en distinguant consommations énergétiques avec et sans bitume.

Les données du tableau I sont suffisamment détaillées pour évaluer les consommations des différentes techniques actuelles d'entretien des chaussées, qu'elles soient renforcées ou qu'elles ne le soient pas.

Agrégation

A ce niveau, il s'agit maintenant d'appréhender les dépenses énergétiques des différentes séquences possibles d'entretien.

L'entretien dépend de la structure initiale de la chaussée ; les calculs ont été réalisés pour 4 types de structure conformes au catalogue des structures des chaussées neuves (édition 1977), pour les classes de trafic T_0 et T_1 et les qualités de sol P F 1 et P F 2.

- chaussée en béton de ciment
- chaussée en grave laitier
- chaussée mixte
- chaussée tout bitume

En fonction d'une structure donnée de chaussée, plusieurs séquences d'entretien ont pu être établies :

- deux séquences pour l'entretien des chaussées semi-rigides ; la première est conforme aux principes du "guide de l'entretien" et au caractère préventif de l'entretien. La seconde repose sur la possibilité de l'emploi de couches minces d'enrobés pour restaurer les qualités superficielles de la chaussée.

- quatre séquences pour l'entretien des chaussées en béton, elles combinent deux séries de paramètres : la durée de vie (20 ou 25 ans) de la structure initiale et le traitement à apporter à la fin de la vie de la chaussée (reconstruction à l'identique ou renforcement).

Sous ces hypothèses, l'équivalence énergétique cumulée sur 25 ans des différentes séquences d'entretien est donnée par le tableau ci-après :

T.E.P. par kilomètre

Qualité du sol	Structures			
	Béton	Grave laitier	Mixte	Tout Bitume
PF 1 Total Général	:1529 - 3345	: 331,8 - 402,9	: 284,4 - 379,2	: 284,4 - 379,2
Total hors bitume	: 38,2 - 83,6	: 66,4 - 80,6	: 56,9 - 75,8	: 56,9 - 75,8
PF 2 Total Général	:1450 - 3355	: 331,8 - 402,9	: 284,4 - 379,2	: 284,4 - 379,0
Total hors bitume	:36,2 - 83,9	: 66,4 - 80,6	: 56,9 - 75,8	: 56,9 - 75,8
PF 1 Total Général	:1728 - 3643	: 316,0 - 387,1	: 284,4 - 355,5	: 284,4 - 355,5
Total hors bitume	:39,7 - 83,8	: 63,2 - 77,4	: 56,9 - 71,1	: 56,9 - 71,1
PF 2 Total Général	:1689 - 3621	: 311,6 - 387,1	: 285,3 - 71,1	: 284,4 - 355,5
Total hors bitume	:38,8 - 83,5	: 62,5 - 77,4	: 57,1 - 71,1	: 56,9 - 71,1

Les fourchettes correspondent aux diverses hypothèses pouvant être retenues en ce qui concerne les différentes structures et les différents scénarios d'entretien. Il convient, dans chaque cas particulier, de déterminer des valeurs intermédiaires.

Ce tableau se rapporte à l'entretien d'une chaussée à 2 voies.

3.2. L'exploitation de l'infrastructure.-

A ce titre devront être pris en compte les dépenses énergétiques imputables au fonctionnement des divers équipements de la route.

... On négligera la consommation des feux de signalisation (le nombre des feux sur la voirie nationale en dehors des agglomérations, gérés par les Services de l'Etat, est en effet très limité : 173) et des panneaux lumineux de quelque sorte que ce soit.

3.2.1. Eclairage public.-

La consommation d'électricité correspondant à l'éclairage public représentait en 1978 2,65 Twh d'une consommation totale de 220,5 Twh soit 1,20% des emplois. (2,65 Twh dont 2,38 en basse tension et 0,27 en moyenne tension).

Les dépenses correspondantes étaient de 545 MF environ compte tenu d'un prix de vente moyen de 0,2057 Francs du Twh.

La part de l'Etat dans ces dépenses est faible. Les dépenses de fonctionnement de l'éclairage public, supportées par le budget de la Direction des Routes et de la Circulation Routière, ont été de 19 MF environ en 1978 : ce montant comprenant les dépenses de courant relatives à l'éclairage proprement dit, mais aussi celles relatives à la signalisation lumineuse, à la ventilation des tunnels.

L'essentiel des dépenses d'éclairage est en effet supporté par les Collectivités Locales du fait :

1) des dispositions réglementaires qui mettent à leur charge les dépenses de fonctionnement de l'éclairage urbain quel que soit le statut de la voie, sauf dans le cas des autoroutes urbaines.

2) du développement jusqu'ici réduit de l'éclairage routier hors agglomération dans notre pays.

Cette situation est susceptible d'évoluer progressivement avec le développement du programme d'équipements en dispositifs de sécurité des routes nationales qui prévoit un effort en matière d'éclairage en même temps que la pose de glissières, de bornes d'appel d'urgence, d'aires de repos, etc..

A court et moyen terme cependant les consommations d'énergie correspondant à l'éclairage du réseau national resteront relativement peu importantes.

Il ne faut toutefois pas en déduire que des économies ne doivent pas être recherchées en ce domaine, en effet, l'Etat peut avoir deux rôles pilotes à jouer que ce soit :

- d'abord, par la recherche de solutions susceptibles d'apporter des économies d'énergie

- ensuite par la réalisation d'installations qui pourront inciter les Collectivités Locales à adapter les dispositifs existants.

3.2.2. Les consommations énergétiques intrinsèques de l'éclairage dépendent d'abord des matériels qui peuvent être utilisés ce sont :

	Consommations électriques	Flux lumineux
- ballons fluorescents (lampes à vapeur de mercure)	400 Watts	23 000 lumens
- lampes au sodium Haute pression	275 Watts	25 500 lumens
- lampes au sodium Haute pression avec ballasts pour lampes à vapeur de mercure	285 Watts	22 500 lumens

3.2.3. Les consommations énergétiques dépendent ensuite de la couleur du revêtement

Ainsi, les consommations peuvent être réduites de 40% à niveau de luminance égal (2 cd/m³) par le passage d'un revêtement de couleur sombre à un revêtement de couleur claire.

1) Revêtement clair

- sodium H P 3 KWH/M2
- ballon fluorescent 7 KWH/M2

2) Revêtement moyen

- sodium Haute Pression 4 KWH/M2
- ballon fluorescent 9 KWH/M2

3) Revêtement sombre

- sodium Haute Pression 5 KWH/M2
- ballon fluorescent 12 KWH/M2

3.2.4. Agrégation.

Pour une installation d'éclairage donnée, la consommation annuelle sera le produit de la consommation intrinsèque horaire du dispositif et du nombre d'heures de fonctionnement.

La durée d'éclairage est elle même fonction des hypothèses d'exploitation qui peuvent être prises

- l'extinction totale de l'éclairage
- la suppression de l'éclairage pendant une partie de la nuit.

La puissance intrinsèque du dispositif peut être réduite par :

- l'extinction d'un foyer sur deux dans le cas de bioptiques ou de luminaires équipés de deux lampes
- le remplacement de lampes Mercure par des Lampes Sodium
- les variations de tension du réseau obtenues soit en interposant une self additive à la self principale, soit en abaissant la tension aux bornes du réseau d'alimentation.

L'intérêt des différentes mesures qui peuvent être prises sera évoqué au chapitre II. Il s'agit :

- du fonctionnement intermittent
- de l'extinction à certaines heures " très creuses "
- de l'extinction d'un foyer sur deux dans le cas de bi-optiques.
- de variations de tension du réseau obtenues soit en interposant une self additive à la self principale, soit en abaissant la tension aux bornes.

L'équivalence des Kwh en termes de TEP ne peut être exprimée qu'en moyenne puisqu'elle varie selon les hypothèses de production du Kwh marginal. On prendra la formule :

: :
: II. - Les enjeux énergétiques :
: :

Pour apprécier de façon satisfaisante la portée de différentes politiques d'économie d'énergie, il convient de situer de façon grossière mais significative les grandes masses des consommations en présence. Il sera ensuite utile d'indiquer dans chaque cas les différentes voies permettant d'espérer des économies d'énergie et de situer l'ordre de grandeur de ces économies possibles. Le groupe n'a naturellement pu que recenser ces quelques grandes lignes d'action et l'objet de cette partie n'est donc pas de déterminer à un horizon donné les économies à atteindre. Bien au contraire les chiffres de réduction de consommation mesurent, à trafic constant et à un horizon indéterminé, l'élasticité des différentes grandes masses énergétiques concernées, l'enveloppe supérieure des gains à espérer à terme compte tenu de la persistance des déterminantes techniques et structurelles existantes.

L'obtention d'économies approchant les chiffres annoncés suppose pour certains postes des délais et des investissements très importants voire des conditions idéales. Pour d'autres les économies annoncées sont réalisables plus facilement et à plus court terme.

Ces marges pourront cependant être comparées si on ne s'attache qu'à n'y voir que l'ordre de grandeur de l'économisable.

II. - 1 Cadre général

Les importations d'hydrocarbures représentent dans leur ensemble non seulement une part importante et une forte augmentation de notre commerce extérieur (19,5% du montant total des importations françaises en 1977 contre 10,7% en 1973) mais encore un facteur de dépendance très sérieux de notre économie vis à vis d'un petit nombre d'Etats étrangers.

Ces importations représentent environ 107 millions de Tep en 1978.

La part de carburant, consommée par les transports est de 34 millions de Tep, la route dépensant environ 25 millions de Tep soit 25% des importations nationales de pétrole.

La part du pétrole en tant que source d'énergie primaire étant appelée à diminuer, les carburants auto étant eux très difficilement substituables à court terme, cette part du transport routier ne peut qu'augmenter dans l'avenir. Selon les hypothèses on estime que les carburants du secteur transports représenteront entre 40% et 50% du total en 1990.

La consommation énergétique dévolue aux transports en général et à la route en particulier ne comprend que les dépenses de carburants et de lubrifiants. C'est certes, nous l'allons voir, la part de loin la plus importante. Il existe cependant d'autres consommations énergétiques liées à la route dont il nous faut à présent examiner le volume.

II.-2 - Construction

II.-2 - 1 - Bilan

L'équivalence énergétique de la construction routière dépend, bien entendu du volume des travaux réalisés une année donnée.

Ce volume est très fluctuant : aussi convient-il de ne pas prendre les estimations données ci-dessous comme des valeurs fixes "ne varietur" mais au contraire comme des ordres de grandeur.

Une étude relativement précise a été menée par le SETRA sur les dernières années où la masse des travaux est statistiquement connue soit 1977 pour les autoroutes et les routes nationales, 1976 pour les chemins départementaux. Pour la voirie communale les résultats ont été obtenus par extrapolation des données sur C.D. Ces statistiques concernent les travaux dont la maîtrise d'oeuvre a été confiée aux D.D.E.

Pour la construction, entretien exclu, on peut chiffrer globalement l'équivalence énergétique de ces travaux à

<p>: : 820 000 T.E.P/an : :</p>

Cette équivalence se décompose comme suit :

	terrasssement	chaussées et ouvrages	dont bitume	TOTAL
autoroute	30 000	146 000	100 000	176 000
R.N.	7 000	296 000	210 000	303 000
C.D.	6 000	182 000	100 000	188 000
V.C	4 500	150 000	100 000	154 500
Total	47 500	774 000	510 000	821 500
%	5,75 %	94,25 %	62 %	

Cette consommation ne représente que 3% de la consommation totale de la route (construction usage et entretien) et par ailleurs que 25 % de la consommation du secteur travaux public estimé à 3,4 Millions de TEP.

La part de bitume est tout à fait prépondérante puisque hors bitume la construction ne représente plus que 311 500 TEP soit à peine plus de 1 % de la consommation totale de la route

Les terrassements en revanche pèsent très peu dans le bilan.

II - 2 - 2 - Politique d'économie d'énergie à la construction -

La part des travaux routiers représente un faible pourcentage des dépenses énergétiques de la route. La recherche d'économies dans ce domaine, sans être à rejeter dans la conjoncture actuelle où chaque TEP compté, doit être cependant ramenée aux justes proportions de son impact.

La première voie qui s'ouvre dans cette perspective n'est d'ailleurs pas sans contrepartie et semble devoir être une impasse.

En effet une réduction des dépenses des travaux routiers par une réduction du volume de ces travaux peut avoir des répercussions négatives sur les consommations des véhicules.

Nous avons vu dans la première partie que de mauvaises caractéristiques géométriques de la route (virages - pentes) et de mauvaises conditions de circulation (saturation bouchons) entraînaient des surconsommations.

Des réductions sur les masses de travaux, qu'elles aboutissent au maintien en activité d'infrastructures mal adaptées ou à la réalisation d'infrastructures nouvelles aux caractéristiques géométriques pénalisantes, s'accompagnent de dépenses supplémentaires en carburants nécessaires à la circulation.

Le propos de la troisième partie sera précisément d'apprécier le bilan énergétique global et actualisé des dépenses énergétiques et de déterminer le choix optimal dans ce domaine.

La deuxième voie sur laquelle des réductions d'énergie peuvent être trouvées est celle de la recherche, à volumes de travaux égaux, de techniques de construction moins dépen- sées en énergie.

De telles techniques sont évidemment à développer au maximum elles concernent :

a) la réduction de la consommation de bitume

Bien que, nous le rappelons, le bitume soit à traiter tout à fait spécifiquement, il est évidemment du plus grand intérêt, ne serait - ce que pour peser sur la fixation des prix de ce produit dont la route est l'utilisateur quasi exclusif, de réduire sa consommation. Plusieurs techniques peuvent être développées pour cela faire :

La construction de chaussées "blanches" est techniquement opérationnelle. Bien que de telles solutions présentent des inconvénients bien connus (fissuration, problèmes de joints, entretien et reconstruction, mise en oeuvre "pointue") qu'elles se heurtent en outre à des obstacles psychologiques de la part de certains maîtres d'oeuvre et qu'enfin elles ne soient pas toujours économiquement favorables, il convient de ne pas les abandonner afin de conserver le savoir-faire et les moyens nécessaires à son emploi.

La réalisation d'enrobés en couches minces. Les couches de bétons bitumineux sont actuellement limitées inférieurement à 6 ou 8 cm pour des problèmes de tenue. La mise au point actuellement en cours, d'enrobés d'épaisseur moindre (3 ou 4 cm) réduirait d'autant les consommations de bitume.

- l'utilisation du soufre en proportion de 25 à 30 % dans les enrobés.

- la substitution totale ou partielle du bitume par des déchets de matières polyéthylène et P.C.V. sont également

des techniques non seulement économiques, en bitumes mais intéressantes dans la mesure où la résistance des enrobés s'en trouve fortement accrue.

Les développements techniques de ces solutions sont à poursuivre et à encourager sous la réserve qu'on ait pu vérifier que leur mise en oeuvre ne demande pas plus d'énergie que le bitume économisé n'en produirait.

b) les économies dans les procédés de fabrication

Plusieurs composants destinés à la construction routière demandent pour leur fabrication une énergie qu'il convient d'économiser. Il s'agit entre autres :

des enrobés : l'emploi des tambours sécheurs malaxeurs qui d'ores et déjà s'est largement répandu, constitue la solution et représente une économie de 20 % par rapport aux centrales classiques.

du ciment : l'amélioration des procédés de la fabrication du ciment est d'ores et déjà en cours grâce à la reconversion de l'industrie vers la voie sèche. Le rendement peut certainement être encore amélioré.

c) les économies dans les procédés de construction

Il s'agit là d'un domaine plus vaste et où les économies à réaliser sont très mal cernées. Il concerne l'organisation générale du chantier, en particulier la réduction des transports, l'ordonnancement des travaux en période favorable, l'emploi maximal de matériaux locaux pour les remblais ou les couches de chaussées, la recherche des moyens de terrassements ou de compactage les plus rentables du point de vue énergétique et le choix de structures de chaussées les moins dépensières en énergie.

Les moyens d'action relèvent soit de la recherche technique (emploi de matériaux considérés actuellement comme impropres aux usages routiers, adaptation du catalogue des structures aux impératifs énergétiques) soit de l'organisation administrative (lancement des travaux en bonne saison) mais surtout de l'ordonnancement du chantier, de la compétence, au premier chef, de l'entreprise, le maître d'oeuvre imposant cependant un certain nombre de contraintes.

On peut penser a priori que l'objectif d'économie d'énergie recherché dans l'organisation des chantiers est parfaitement compatible avec le souci d'économie générale qui est celui des maîtres d'oeuvre et de l'entreprise (transports - équilibre des terrassements, moyens de compactage.....) et que le prix de l'énergie pèse d'un poids suffisant pour que son gaspillage ne puisse pas être financièrement supportable.

Encore faudrait-il le vérifier et, le cas échéant, infléchir les conduites de chantier dans le sens souhaité.

L'élasticité de la consommation liée à la construction, à ces mesures ou à d'autres qui restent à définir, est très délicate à chiffrer.

En ce qui concerne le développement des techniques "blanches" on peut calculer, à partir des statistiques des constructions routières ayant servi à estimer le bilan et jointes en annexes, les consommations de bitume qu'entraînerait le recours systématique pour la construction neuve à des structures blanches. Ce recours systématique est naturellement un cas d'école car, comme on l'a vu, les structures noires ou mixtes restent souvent les seules vraiment opérationnelles.

La part chaussées passe alors de 774 000 à 450 000 Tep/an et le total construction est réduit à 497 000 Tep/an soit une économie de l'ordre 300 000 Tep/an principalement de bitume.

Les économies à attendre de l'amélioration des procédés de fabrication et de construction peuvent concerner quant à elles de l'énergie "noble".

Il paraît peu raisonnable d'espérer conserver ainsi plus de 20% de la part hors bitume de la construction - soit environ 50 000 Tep/an.

On peut résumer ces considérations par le tableau suivant :

<u>Construction</u>	
Dépenses	: Economies théoriques maximales
	: :
820 000 Tep/an	: abandon structures noires
	: pour la construction neuve
	: 300 000 Tep
dont 520 000 tep	: de bitume
de bitume	: <u>amélioration procédés</u> 50 000 Tep
	: 350 000 Tep dont 300 000 bitume

II - 3 Usage

II - 3 - 1 - Bilan

C'est bien la consommation en carburants de la circulation automobile qui représente la part prépondérante des dépenses pétrolières liées à la route. Si on y ajoute l'équivalence énergétique des lubrifiants utilisés on obtient un total de l'ordre de: 25 millions de TEP par an

Or cette consommation n'est pas substituable à un horizon prévisible et l'évolution dans les années à venir de sa demande ne peut être significativement infléchie sans que soient remises en cause les données de l'économie nationale.

Il est donc du plus haut intérêt d'examiner attentivement les gains possibles à véh x km donnés, des consommations énergétiques de la circulation.

II - 3 - 2 Politiques d'économie d'énergie-

a) L'infrastructure

Nous répéterons ici que l'inadaptation géométrique et le défaut de capacité des infrastructures peuvent être source pour le trafic de surconsommations inutiles et nous reporterons aux chapitres suivants le calcul de l'intérêt énergétique des opérations routières.

Les dépenses énergétiques de la construction représentent environ 3% de consommation du secteur routes.

Si on se livre à un calcul d'ordre de grandeur qui consiste à évaluer la part économisable grâce à la construction routière, on doit faire un certain nombre d'hypothèses normatives

- les autoroutes n'entraînent pas d'économies compte tenu de l'augmentation des vitesses pratiquées

- la construction neuve porte annuellement sur 200 km de routes nationales et 550 km de chemins départementaux

- l'économie sur les consommations est de 10% . Comme elle est cumulative, on prendra l'économie moyenne la dixième année.

- le trafic concerné est de 4000 véh/j compte tenu de ces hypothèses très simplificatives, on obtient un total de 130 000 Tep/an

b) Le véhicule

La conception de modèles économes en carburant a été l'une des préoccupations constantes des constructeurs du fait du prix des carburants à la pompe.

L'action de recherche d'économies d'énergie s'est développée dès les premiers phénomènes de renchérissement du prix du pétrole pour améliorer les véhicules eux-mêmes.

Les pouvoirs publics et les constructeurs poursuivent des recherches dont les résultats commencent à être mis en application sur des modèles en cours de commercialisation.

Ces recherches portant sur des modifications réalisables à court ou à long terme, s'orientent dans six grandes directions. Les effets attendus sur la réduction de consommation des véhicules dépendent de l'état d'avancement de ces recherches et ne porteront que sur les véhicules neufs mis en circulation chaque année.

- amélioration de l'aérodynamisme

La réduction du "Cx", qu'elle soit obtenue par la conception globale du véhicule ou par des améliorations ponctuelles (parechocs et ailes enveloppantes, déflecteurs pour P.L...) minimise la puissance utilisée à vaincre la résistance de l'air (elle représente 70% de la résistance globale en palier à 130 km/h) et donc permet d'atteindre des vitesses maximales identiques avec des puissances installées plus faibles (les autres performances s'en trouvent certes dégradées). Des économies de consommation de 20 à 25% à 130 km/h peuvent être valablement envisagées de ce fait.

- allègement du véhicule

Il peut être obtenu par l'emploi de matériaux légers (aluminium, plastique) ou la mise en oeuvre de nouvelles technologies, un tel allègement trouve en fait vite ses limites pour les véhicules européens et le gain à attendre ne dépassera guère 5 à 10%.

- optimisation des transmissions

A puissance développée égale, la consommation spécifique des moteurs varie d'une façon importante avec la vitesse de rotation du moteur. Il est donc nécessaire d'optimiser la transmission de façon à faire fonctionner le moteur le plus fréquemment dans la plage de régime économique.

Les moyens d'y parvenir consistent en l'adaptation des rapports de boîte, ou l'utilisation d'une transmission à variation continue qui à tout moment fixe le régime de rotation du moteur à sa valeur optimale.

- emploi de l'électronique

En permettant de prendre en compte à tout instant les différents paramètres caractérisant le fonctionnement du véhicule, de les intégrer, et d'en déduire une stratégie assurant l'optimisation du rendement, l'électronique peut apporter des gains d'énergie significatifs.

La préparation du mélange air-carburant, le rapport de transmission, pourraient ainsi être optimisés automatiquement en fonction des différentes données utiles captées directement.

- amélioration de la carburation

Dans l'état actuel de la technologie du carburateur, l'électronique, nous venons de l'évoquer, peut améliorer le rendement énergétique.

D'autres voies de recherches sont ouvertes en ce qui concerne l'injection mécanique ou électromagnétique. La mise au point d'homogénéiseur, ou de dispositifs à charge stratifiée. Ce dernier système théoriquement très prometteur (35 à 40% en cycle urbain) en fait pour le moment assez décevant, /réalisé d'un mélange est et est

ponctuellement très riche en carburant près de la bougie capable de transmettre l'étincelle à l'ensemble du mélange beaucoup plus pauvre.

Enfin l'emploi du turbo-compresseur actionné par les gaz d'échappement pour introduire dans les cylindres des mélanges sous pression permet d'augmenter la puissance à cylindrée égale ou de réduire la cylindrée, donc la consommation à puissance et performances égales.

- amélioration du moteur

Le moteur conventionnel à essence ou fuel semble pour quelque temps encore le seul à s'imposer. Des améliorations à son fonctionnement sont parfaitement envisageables : citons la céramisation des cylindres susceptible d'accroître le rendement du moteur ou la mise au point du moteur à "cylindrée variable", dans lequel l'électronique permettrait l'ajustement du nombre de cylindres en fonctionnement à la demande de puissance.

Enfin l'espoir de la mise au point de nouveaux moteurs, quoique faible, ne doit pas être abandonné tant dans le domaine du moteur à explosion que dans celui du moteur électrique.

Quelles économies espérer de telles mesures ? Là encore le pronostic est difficile.

Les conclusions des rapports Deutch et Merlin comportaient des prévisions de 10 à 15% d'ici 1985. De telles prévisions sont compatibles avec les orientations données par les Pouvoirs Publics aux constructeurs.

D'une consommation moyenne de 8,5 l en 1976 on passerait à 7,3 l en 1985. soit 14% environ.

Au-delà de l'horizon 1985 il n'est pas exclu que de nouvelles économies soient réalisables dans le domaine des véhicules : elles restent cependant plus hasardeuses mais compte tenu de l'importance de l'enjeu, des recherches dans ce sens doivent être poursuivies.

Nous retiendrons donc comme marge économisable grâce à l'amélioration des véhicules, celle envisagée par les modèles 1985 mais appliquée à l'ensemble du Parc ce qui implique donc un horizon beaucoup plus lointain.

C'est donc à terme 3 millions de Tép/an qui constituent l'enjeu de l'action dans ce domaine.

c) Le conducteur et l'action réglementaire

L'expérience quotidienne de chaque conducteur et les campagnes de mesure montrent à l'évidence que le style de conduite détermine même à vitesse moyenne et maximale constante les consommations, dans une proportion qui, individuellement, peut être de l'ordre de 10 - 15%.

Il est donc bien évident que les Pouvoirs Publics ont tout intérêt à sensibiliser les automobilistes dans ces domaines et, par une action non autoritaire, à les inciter à l'économie d'énergie en leur recommandant des principes simples de conduite et d'entretien de leur véhicule.

il reste que la mesure effective de l'efficacité de ces mesures doit être réalisée aussi bien à court qu'à long terme et que celle-ci sera d'autant moins significative que les modèles seront améliorés : il importe donc de ne pas faire de double compte avec l'estimation précédente.

On prendra ainsi une sensibilité de 5% soit

1,25 millions de Tep/an

L'intérêt énergétique d'une réglementation plus sévère sur les limitations de vitesse est évident à la simple vue des courbes consommation/vitesse.

Il faut en premier lieu considérer que le simple respect des vitesses limites actuelles, qui connaissent un taux de désobéissance important, (39% à plus de 90 km/h sur route et 14% à plus de 130 km/h sur autoroute) entraînerait pour les voitures particulières une économie de l'ordre de 300 000 Tep.

Une diminution des seuils actuels, qui s'accompagne-rait d'un taux de désobéissance vraisemblablement plus élevé, entraînerait des économies marginalement plus importantes sur le réseau routier que sur les autoroutes. Ainsi, une limitation à 80 km/h (- 10 km/h) sur RN. et CD. induirait une économie de 210 000 Tep, alors qu'une limitation à 110 km/h (- 20 km/h) sur autoroute de liaison dégagerait 110 000 Tep. L'enjeu d'un scénario à 80 km/h/120 km/h est donc d'environ 300 000 Tep/an. soit, c'est à noter, l'ordre de grandeur de l'économie résultant de l'application stricte des limitations actuelles.

En ce qui concerne les Poids Lourds un calcul rapide indique qu'un abaissement des vitesses - limites de 10 km/h peut entraîner des économies annuelles de l'ordre de 100 000 Tep.

Il est à remarquer^{que,} pour clore ce paragraphe consacré aux limitations de vitesse, alors que les politiques d'économie d'énergie envisagées jusqu'ici ne comportaient pas d'effets pervers, les mesures réglementaires peuvent avoir sur le contexte économique général des effets particulièrement néfastes.

Laissant de côté les aspects politiques et impopulaires de telles mesures, on ne doit pas perdre de vue du strict plan économique :

1) que des limitations très rigoureuses rendraient vraisemblablement l'industrie automobile française moins motivée et donc moins compétitive sur le marché international.

2) qu'une limitation sur autoroute inférieure à 100 km/h ne semble acceptable pour un V.L. que si l'autoroute est hors péage ou si le réseau parallèle est très dissuasif soit par ses caractéristiques géométriques soit par son urbanisation.

Si l'on compare les limitations autoroutières françaises au reste des règlements européens, il ne faut certes pas négliger ce facteur.

Une limitation draconienne sur autoroute en France pourrait poser donc le problème de l'existence ou de la survie même de ces autoroutes à péage. Or ces autoroutes, non seulement sont indispensables au développement du pays mais présentent on l'a vu un intérêt énergétique certain pour les Poids-Lourds dont la consommation de carburant est importante en volume et "stratégiquement" sensible.

C'est en toute connaissance de cause que des mesures de limitation de vitesse ou toute autre mesure réglementaire (restrictions périodiques de circulation, rationnement.....) doivent être envisagées.

Pour clore ce chapitre nous ferons le bilan des grandeurs évoquées.

Usage

Consommation	Economies théoriques maximales	
25 millions de Tep/an	: construction infras-structures	: 130 000 Tep/an
	: amélioration véhicules	: 3 millions Tep/an
	: conditions de conduite	: 1,25 millions Tep/an
	: réglementation 80-120 km/h	: 400 000 Tep/an
		: 4,78 Millions Tep/an

II.4 Entretien et exploitation

II.4.1. Bilan

a) Entretien

Nous avons retenu comme dépenses énergétiques significatives liées à l'entretien celles qui concernent les chaussées et dont le poste principal est le bitume.

On peut estimer globalement l'énergie consacrée aux travaux routiers affectés à l'entretien à 1400 000 Tep/an. La part du bitume dans ce total est de 1140 000 Tep donc particulièrement prépondérante et donc, bien entendu, les réserves formulées à l'égard de la prise en compte du bitume en tant que produit énergétique prennent toute leur importance ici.

Ce point ne doit pas masquer l'importance relative, en particulier vis à vis de la construction, du poste entretien qui représente en outre 40% de la consommation "travaux-Publics".

b) Exploitation

On a également distingué dans les dépenses d'exploitation un poste prépondérant qui est celui de l'éclairage public. Ce poste représente environ 660 000 Tep/an.

Encore faut-il remarquer que l'éclairage public ne concerne qu'assez marginalement la route et la circulation routière. Si l'Etat est impliqué pour environ 4% dans l'éclairage des carrefours en rase campagne et des autoroutes ou voiries rapides urbaines, la quasi totalité des dépenses concernent les Collectivités Locales. Par ailleurs l'éclairage public en milieu urbain concourt autant sinon plus à la sécurité des piétons et à l'animation urbaine qu'à la sécurité de la circulation routière.

Il faut également noter que l'éclairage consomme de l'électricité dont la source d'énergie primaire est substituable à la différence de la plupart des énergies évoquées jusqu'ici et que, se situant en "heures creuses", le coût marginal de telles dépenses est susceptible, avec le développement du nucléaire, d'une évolution favorable.

Il n'en est pas moins vrai que l'éclairage fait, aux yeux des usagers, souvent figure de symbole et que des économies doivent être cherchées là comme ailleurs ne serait-ce que pour la valeur de l'exemple.

Notons, pour être complet, qu'au poste exploitation figurent également les dépenses non négligeables des feux de signalisation.

Ces dépenses sont de l'ordre de 80 000 Tep/an.

II.4.2. Politique d'économies d'énergie dans l'entretien et l'exploitation.

a) Entretien

Une action fondée sur l'innovation technologique semble de nature à entraîner des économies dans l'emploi du bitume dans l'entretien des chaussées.

Il paraît au premier abord que les enrobés d'entretien qui représentent globalement 675000 Tep/an, c'est-à-dire la moitié de l'énergie d'entretien, pourraient être remplacés dans beaucoup de cas par des enrobés en couches minces ou des enduits beaucoup moins dépensiers en bitume.

Les économies appliquées à la fabrication des enrobés et évoquées au chapitre construction sont à reprendre au titre de l'entretien.

-Les techniques de "point à temps" étant relativement très énergivores, il conviendrait de mettre en valeur d'autres procédés, en particulier des "techniques enrobés" parfaitement opérationnelles mais dont la mise en oeuvre se heurte à des inerties auxquelles il importe de remédier.

Enfin, il ne fait pas de doute qu'une vision plus globale de la politique d'entretien serait de nature à rationaliser cette opération : de la conception d'une structure de chaussée présentant le meilleur bilan énergétique (construction plus entretien) à l'intervention des équipes sur le terrain, une réflexion prenant en compte résolument le souci d'économie d'énergie doit être menée. L'ordre de grandeur des économies à attendre sur le poste entretien ne devrait pas dépasser 10% soit 140 000 Tep/an.

b) L'éclairage

Plusieurs moyens existent pour réduire les consommations de l'éclairage. Ils doivent être appréciés en fonction des effets négatifs qu'ils peuvent entraîner en particulier sur la sécurité et sur la balance commerciale.

On peut imaginer

- l'extinction totale de l'éclairage

Cette mesure extrême aurait une incidence très négative sur l'écoulement du trafic aux heures de pointe et surtout sur la sécurité routière.

Les risques encourus sont d'autant plus grands qu'il ne serait pas possible de rétablir l'éclairage sans un délai important.

Par ailleurs une telle mesure serait très mal ressentie par l'opinion publique, hors période de crise majeure.

- le fonctionnement intermittent

L'extinction à certaines heures de la nuit de l'éclairage pourrait permettre des économies substantielles, (en cas d'application entre 1h et 5h, la réduction de consommation serait de 30 à 40% alors que le trafic touché serait compris entre 3 et 5% du trafic journalier moyen). Toutefois sur le réseau national, les règles qui président à l'équipement du réseau en dispositifs d'éclairages (points singuliers dangereux la nuit, autoroutes urbaines à fort trafic de nuit) sont contradictoires avec cette possibilité. Par ailleurs elle présente l'inconvénient de ne pouvoir être appliquée qu'après des modifications longues et coûteuses, dans le cas fréquent où l'alimentation de l'éclairage n'est pas dissocié de celle de la signalisation.

- la réduction de l'éclairage pendant la totalité de la nuit

Cette mesure est la plus facile et la moins coûteuse à mettre en oeuvre. Elle présente l'inconvénient de réduire la qualité du service assuré pour la totalité des usagers et de n'être pas réversible sans délai.

Les systèmes utilisés actuellement sont basés sur l'extinction d'un foyer lumineux ou d'une lampe sur deux ; ainsi, nous trouvons :

a) Extinction d'un foyer sur deux

Ce système était l'un des plus utilisés en France, mais il s'est révélé le plus dangereux au plan de la sécurité, car si, puissance de l'installation est réduite de moitié, l'effet photométrique résultant sur la chaussée est désastreux au niveau de l'uniformité de luminance, (effet d'échelle-trous noirs).

b) L'extinction d'une lampe sur deux - luminaire équipé de deux lampes

Ce système, bien que plus onéreux que le premier, en coût d'investissement, a l'avantage de ne pas modifier exagérément les conditions photométriques initiales, mais il faut déplorer le mauvais rendement photométrique obtenu dû à l'emplacement des lampes qui ne sont pas au foyer de miroir.

c) Extinction d'une lampe sur deux - luminaire à double optique

Ce système fait usage d'un luminaire à deux optiques. Il est du point de vue photométrique, celui qui conserve le meilleur coefficient d'uniformité de luminance au moment de l'extinction d'un foyer. Malheureusement, le coût du premier investissement en est très élevé.

- le remplacement de lampes Mercure par lampes Sodium (voir annexe)
- la variation de tension du réseau

Ce résultat peut être obtenu soit en interposant une self additive à la self principale, soit en abaissant le niveau de la tension du réseau d'alimentation.

Toutefois il ne faut pas que la tension aux bornes de la lampe soit trop basse, car alors la lampe "décroche" et s'éteint. Par ailleurs, cette technique ne semble pas applicable aux lampes à vapeur de sodium Basse Pression.

La consommation énergétique de ces procédés est de 30 à 50 % inférieure à celle des systèmes conventionnels.

Diverses applications peuvent être faites de cette technique, par exemple l'allumage pourrait être lancé à demi-puissance pendant un quart d'heure, ensuite il fonctionnerait à pleine puissance jusqu'à 20 heures puis à demi-puissance de 20 h à 6 h...."

L'économie maximale à attendre des mesures préservant la qualité de service peut être estimée à 300 000 Tep.

Gestion	Economies théoriques maximales	
<u>Entretien</u>	:	:
1 400 000 Tep/an	:	:
	: Rationalisation de	: 140 000 Tep/an
	: l'entretien	:
<u>Eclairage</u>	:	:
660 000 Tep/an	:	:
	:	: 300 000 Tep/an
<u>Feux de signal</u>	:	:
80 000 Tep/an	:	:
<hr/>	:	:
2 140 000	:	:
	:	: <hr/>
	:	: 440 000 Tep/an
	:	:
	:	:

III.1 Cadre général

Connaissant d'un côté les dépenses en termes d'énergie des investissements et de l'entretien dans le domaine routier, de l'autre les avantages éventuels en ce qui concerne la consommation du trafic, il est possible de dresser pour chaque opération particulière le bilan actualisé (BEA) en Tep ou en "petro-francs".

Quelques remarques importantes s'imposent dès l'abord

1) Le BEA est un bilan micro-économique et partiel. Il ne saurait prendre en compte les répercussions sur différents paramètres importants de sa maximisation. Nous aurons l'occasion lorsque nous examinerons l'intérêt de chaque type d'opération au point de vue énergétique de mentionner les autres effets que ces opérations peuvent entraîner par ailleurs.

Pour ces raisons, le bilan énergétique des opérations routières ne devrait jamais être dissocié du bilan économique en termes de gain de temps, de sécurité ... qui est effectué par le calcul de rentabilité classique : aussi nous efforcerons nous dans le chapitre III d'intégrer ce bilan dans les facteurs du calcul du surplus des investissements routiers.

De même, l'intérêt énergétique de la route que nous essayons de mettre en évidence par les masses directement en jeu et qui est en grande partie pour la nation un intérêt en termes de balance commerciale extérieure, doit-il s'apprécier plus globalement par l'apport que détermine la route à l'activité et à la compétitivité internationale du pays : rappelons à cet égard que l'automobile constitue plus de la moitié du solde excédentaire de notre balance extérieure dans le secteur industriel.

Plus généralement il convient de mesurer les conséquences de restrictions durables de pétrole sur l'activité industrielle.

Le B.I.P.E., à la demande d'E.D.F., a défini dans une étude récente l'impact d'une réduction de 50% du ravitaillement en pétrole et de 30% du ravitaillement énergétique du pays qui est ainsi ramené à son niveau de 1967.

Dans le tableau très pessimiste que brosse cette étude, l'industrie automobile est évidemment atteinte de plein fouet, entraînant toute une série d'industries sous-traitantes. Le secteur industriel dans son ensemble voit son activité réduite d'un tiers et crée une mise en chômage brutale de 3 à 4 millions de personnes.

2) Le choix exclusif des opérations routières par leur bilan énergétique trouverait ses limites non seulement par le caractère partiel du calcul que nous venons d'évoquer, mais encore par les hypothèses de non rationnement qu'une telle approche supposerait.

45

Dans le cas de restrictions physiques il s'avèrerait en effet nécessaire de résoudre un problème complexe consistant à choisir parmi un nombre très élevé de solutions la ou les stratégies qui, par la réalisation d'un certain nombre d'opérations, satisferait à la contrainte et maximiserait le bénéfice pour la collectivité.

Une telle démarche supposerait que soient, au préalable définis par rapport à la contrainte générale d'importation nationale de pétrole, les quotas énergétiques optimaux dévolus à la construction routière et à la consommation des véhicules.

De tels problèmes ne seront pas examinés dans le cadre de ce rapport, il serait cependant du plus haut intérêt qu'une voie de recherche soit ouverte dans ce domaine.

Le cadre théorique dans lequel le calcul de l'intérêt énergétique des opérations routières doit se développer est celui classique, du bénéfice actualisé.

$$B = \sum_{t=1}^N \left(\frac{A_t}{(1+a)^t} - \frac{E_t}{(1+a)^t} \right) - I$$

où on appelle

I = équivalence énergétique de l'opération

A_t avantage énergétique de l'opération de l'année t

a_t taux d'actualisation

E_t équivalence énergétique de l'entretien l'année t

N durée de vie de l'opération

Ce bénéfice actualisé peut être exprimé soit en termes physiques (TEP) soit en termes monétaires (F).

III. 1-1 Bénéfice physique

Explicitons, dans le cas où le bilan s'exprime en TEP les grandeurs prises en compte.

→ I = est obtenu directement par le calcul indiqué en I 1) consommation énergétique à la construction.

→ A_t : l'année t on considère qu'un trafic t_t emprunte la "nouvelle" infrastructure et qu'il a une consommation moyenne de c_t . Il peut par ailleurs éventuellement demeurer sur "l'ancienne" infrastructure un trafic t'_t , consommation c'_t .

La consommation de ce trafic est :

$$t_t c_t + t'_t c'_t$$

Si l'opération n'avait pas été réalisée, l'"ancienne" infrastructure aurait connu un trafic $t_t + t'_t - i_t$ où i_t est l'induction estimée à l'année t , consommant unitairement c''_t .

Le bilan des consommations est donc, l'année t , si l'on déduit des avantages la moitié de la consommation du trafic induit.

$$A_t = (t_t c_t + t'_t c'_t) + (t_t + t'_t - i_t) c''_t + \frac{i_t}{2} nc + \frac{i_t}{4} c_t$$

on considérera souvent que c_t , qui ne dépend pas de l'état de trafic (supposé fluide pendant la durée de vie de l'opération), est constant aux améliorations des véhicules près d'où $c_t = \left(1 - \frac{t}{100}\right) c_1$ $1 < t < 10$ pour $1 = 75$

$$c_t = 0,90 c_1 \quad t > 1985$$

Les trafics s'évaluent selon les modèles actuellement usités.

- a. est nul puisqu'il s'agit d'un bilan physique qui ne doit pas être actualisé
- E_t ou plutôt $\sum E_t$ est donné par le tableau de I.3.1.
- N = pourra être pris égal à 25 ans.

III. 1-2) Bénéfice monétaire

Il s'agit d'attribuer un prix à la Tep.

Ce coût peut s'apprécier de différentes façons et est évidemment très sensible aux hypothèses qui peuvent être faites pour son actualisation.

La Tep peut être actuellement estimée, soit directement par son prix d'achat ramenée à la Tonne de pétrole brut, soit par le prix de revient moyen des différents distillats concernant la route (bitume, fuels, essence) soit enfin par le prix de vente toutes taxes comprises de ces différents produits (ce qui entraîne une distorsion très importante pour les carburants).

Nous considérons que les surtaxations des carburants interviennent comme des transferts (ce qui est d'ailleurs supposé dans les calculs de rentabilité) et que le coût de raffinage ^{correspond} à une dépense principalement intérieure ne reflétant nullement le coût de la dépendance ou de la pénurie, et déjà prise en compte par le coût de construction de l'infrastructure et les dépenses des usagers.

Il nous semble donc que la variable pertinente, si l'on tient à exprimer en termes monétaires le B.E.A., est en fait le prix d'achat du pétrole brut, qui détermine véritablement notre dépendance vis-à-vis de l'étranger et qui reflète ou reflèterait la pénurie (physique ou spéculative) de pétrole.

L'actualisation de ce coût fait l'objet d'hypothèses largement diversifiées développées par les experts nationaux ou internationaux et qui tiennent, il faut le reconnaître, largement de la divination !

Il semble peu raisonnable toutefois de considérer que ce prix pourrait ne pas au moins suivre l'évolution des prix en francs constants.

Cette hypothèse qui consiste dans le bilan à multiplier les consommations en TEP de l'année par le coût actuel du brut et à diviser cette quantité par $(1 + a)^t$, où a est le taux d'actualisation du Plan, est une hypothèse réputée comme optimiste. Des hypothèses moins optimistes (croissance 50% en francs constants d'ici 90) soit environ 3% par an peuvent être prises en compte. Elles conduisent à des séries moins rapidement convergentes (puisque la dépense de l'année t est multipliée par $\frac{(1 + e)^t}{(1 + a)^t}$, où a est le taux du Plan et e le taux de croissance en francs constants de la tonne de pétrole).

Le modèle d'estimation est ainsi posé.

Nous nous efforcerons ci-dessous d'indiquer^{par} l'étude de quelques cas concrets, les bilans qui peuvent être concrètement mis en jeu.

Ces études s'appliquent à des opérations qui ne présentent nullement un caractère exemplaire du point de vue énergétique. Il ne s'agit donc pas de tirer des conclusions définitives des résultats obtenus mais bien plutôt d'y voir l'illustration pratique et ponctuelle des considérations développées.

III.2 - BILAN ENERGETIQUE DES INVESTISSEMENTS ROUTIERS

III.2-1 - Routes Interurbaines :

L'appréciation de l'intérêt énergétique peut être nécessaire pour répondre à deux sortes de questions :

- la première concerne le choix entre variantes d'un même projet d'infrastructure nouvelle.

Outre la longueur, nous avons vu en effet que les caractéristiques géométriques (sinuosité, pentes, carrefours) ont une influence sur la consommation.

On devra donc examiner le bilan entre les différentes variantes.

- Autoroutes (vitesse de référence 100 - 120 ou 140 km/h)
- Routes Express (vitesse de référence 100 ou 120 km/h)
- Aménagements sur place à 2 x 2 voies, calibrage à 10,5 m et 7 m
- Routes neuves à 2 ou 3 voies à différentes vitesses de référence . (100 et 120 km/h).

Le S.E.T.R.A. a réalisé une telle étude sur les variantes du projet LE MANS - RENNES.

ETUDE LE MANS RENNES

COMPARAISON ENERGETIQUE DE VARIANTES
D'AMENAGEMENT D'UNE LIAISON INTERURBAINE
LE MANS - LAVAL

Les résultats résumés ci-dessous portent sur 24 kilomètres de la liaison LE MANS - LAVAL, sur lesquels plusieurs aménagements ont été envisagés.

- . L'autoroute avec ou sans péage, en vitesse de référence de 120 ou de 140 km/h.
- . La route neuve à 2 x 2 v, 3 v ou 2 v, avec vitesse de référence de 100 ou de 120 km/h.
- . L'aménagement sur place à 2 x 2 v, 10,5 m ou 7 m, à vitesse de référence de 100 km/h et avec déviation des agglomérations.

Le trafic sur l'axe est supposé comporter 15 % de poids lourds.

I - EFFET DU PARTI D'AMENAGEMENT :

Le tableau 1 indique l'effet des aménagements sur une année de circulation ; cet impact est comparé dans le tableau 2 aux autres effets des aménagements : gains de temps, gains de confort, gains de sécurité et avantages du trafic induit.

Il apparaît ainsi plusieurs types d'aménagement :

- . Ceux qui permettent des gains en temps, confort et sécurité importants, mais accroissent parallèlement la consommation de carburant sur l'axe de 14 à 22% : les aménagements lourds à chaussées séparées.
- . Ceux qui conduisent à un moindre accroissement de la consommation tout en apportant des gains de temps encore assez importants et n'ayant en revanche qu'un faible effet sur la sécurité : les aménagements à 3 voies.
- . Ceux enfin qui permettent à la fois des gains de temps moyens, une sécurité légèrement améliorée et une moindre consommation de carburant sur l'axe : les aménagements à 2 voies.

Pour ce dernier type d'aménagement, les gains de temps des voitures particulières correspondent essentiellement à la suppression de la congestion au droit des agglomérations et à l'amélioration des caractéristiques du tracé, modifications qui sont également bénéfiques du point de vue énergétique.

Il faut cependant souligner le caractère théorique de l'ASP à 2 voies sous 15000 véhicules/jour qui peut être illustré en remarquant que, sur cet aménagement et sur l'ensemble de l'année :

- 10% des V.L roulent à une vitesse moyenne horaire comprise entre 80 et 90 km/h
- 40% à une vitesse comprise entre 70 et 80 km/h
- 42,5% à une vitesse comprise entre 60 et 70 km/h
- 8% à une vitesse comprise entre 40 et 60 km/h
- 2,5% à une vitesse comprise entre 20 et 40 km/h

L'aménagement, bien que rentable, ne procure donc qu'un niveau de service très médiocre dans le cas d'un trafic moyen annuel élevé.

Les autres aménagements en raison des vitesses élevées pratiquées par l'usager et de l'induction du trafic ont un impact énergétique défavorable.

En ce qui concerne les poids lourds, l'effet de l'aménagement est toujours bénéfique et, résultant essentiellement de l'amélioration du profil en long, varie assez peu avec le parti d'aménagement.

Le tableau 3 présente le bilan énergétique physique des aménagements, sans actualisation, et le tableau 4 le bilan énergétique actualisé en francs. On voit que la correction du bénéfice micro-économique classique (calculé selon l'instruction de Novembre 1974) par le terme 0,2x BEA reste très marginale.

II - INCIDENCE DE LA VITESSE DE REFERENCE

Le tableau 5 montre les conséquences qu'a sur le plan énergétique le fait de donner au projet une vitesse de référence élevée (140 km/h au lieu de 120 pour l'autoroute, 120 au lieu de 100 pour les autres aménagements).

Il apparaît immédiatement que la consommation supplémentaire entraînée à la construction est compensée en quelques années par l'économie réalisée lors de la circulation des véhicules sur un meilleur tracé. Il y a donc tout intérêt, d'un simple point de vue énergétique, à doter les projets de vitesses de référence élevées.

TABLEAU 0 : CARACTERISTIQUES DES AMENAGEMENTS

	Vitesse de référence (km/h)	Longueur (km)	Rampe moyenne (%)	Σ sinuosité ($\Sigma\alpha$ /km)
Autoroute	140	24,6	1,13	0,300
Route neuve	120	25	1,28	0,365
A.S.P.	100	24,4	1,29	0,548
Route existante	-	24,1 (dont 3,9 en agglomération)	1,90	0,311 + 4 virages à petit rayon

**TABLEAU 1 : IMPACT ENERGETIQUE ANNUEL DES AMENAGEMENTS
SUR LA CONSOMMATION DES VEHICULES**
(en valeur absolue et en % par rapport à la situation non
aménagée).

	TJMA de 5 000 véh/j	TJMA de 10 000 véh/j	TJMA de 15 000 véh/j
P		+ 1 550 TEP (+ 22 %)	+ 2 400 TEP (+ 22 %)
		+ 950 TEP (+ 14 %)	+ 1 600 TEP (+ 15 %)
2x2 v		+ 1 000 TEP (+ 14 %)	+ 1 500 TEP (+ 14 %)
3 v		+ 350 TEP (+ 5 %)	+ 500 TEP (+ 5 %)
2 v		- 200 TEP (- 3 %)	- 200 TEP (- 2 %)
P 2x2 v		+ 1 300 TEP (+ 18 %)	+ 1 900 TEP (+ 18 %)
P 3 v		+ 500 TEP (+ 7 %)	+ 700 TEP (+ 7 %)
P 2 v	- 60 TEP (- 2 %)	- 140 TEP (- 2 %)	- 400 TEP (- 4 %)

TABLEAU 2 : EFFETS ANNUELS DES AMENAGEMENTS
(sous 15 000 véh/j)

	Gains de temps	Véh x km sur chaussées séparées	Gain de sécurité (F 74)	Impact énergétique à la circulation	Avantage du trafic induit (F 74)
AHP	830 000 h	10^8	2,85 MF	+ 2 400 TEP	1,65 MF
AP	710 000 h	$0,74 \times 10^8$	2,03 MF	+ 1 600 TEP	0,58 MF
RN 2x2 v	710 000 h	10^8	0,77 MF	+ 1 500 TEP	0,70 MF
RN 3 v	610 000 h	-	0,33 MF	- 500 TEP	0,17 MF
RN 2 v	460 000 h	-	0,17 MF	- 200 TEP	-
ASP 2x2 v	900 000 h	$1,37 \times 10^8$	1,26 MF	+ 1 900 TEP	0,82 MF
ASP 3 v	690 000 h	-	0,11 MF	+ 700 TEP	0,25 MF
ASP 2 v	450 000 h	-	0,55 MF	- 400 TEP	-

**TABLEAU 3 : BILAN ENERGETIQUE PHYSIQUE DES AMENAGEMENTS
SUR 25 ANS, SANS ACTUALISATION
(mise en service sous 10 000 véh/j)**

.. milliers le TEP)	Construction	Entretien	Circulation	Bilan physique	Bilan par km d'itinéraire aménagé
HP	17	15	64	96	4
P	17	15	42	74	3,1
N 2x2 v	15	15	40	70	2,9
N 3 v	11	11	13	35	1,5
N 2 v	7,5	7,5	- 6	9	0,4
SP 2x2 v	15	15	50	80	3,3
SP 3 v	11	11	18	40	1,7
.. SP 2 v	7	7,5	- 11	3,5	0,15

TABLEAU 4 : BENEFCES ACTUALISES A LA DATE OPTIMALE DE MISE EN SERVICE

(MF 74)	Bénéfice classique (1)	B.E.A. (coût du pétrole constant)	Bénéfice classique (1) + 0,2 x B.E.A.
AHP	82	- 20	78
AP	51	- 16	48
RN 2 x 2 v	64	- 15	61
RN 3 v	39	- 8	37
RN 2 v	43	- 3	42,5
ASP 2 x 2 v	81	- 16	78
ASP 3 v	59	- 9	57
ASP 2 v	44	- 2	43,5

(1) Ces chiffres ne prennent pas en compte l'avantage d'une réalisation plus rapide de l'autoroute à péage.

TABLEAU 5 : EFFET DE L'ACCROISSEMENT DE LA VITESSE DE REFERENCE

	Augmentation de la consommation à la construction	Economie à la circulation (1 an à 15 000 véh/j)	Variation du bilan physique
AHP	400 TEP	200 TEP	- 4 900 TEP
AP	400 TEP	120 TEP	- 2 900 TEP
RN 2x2 v	300 TEP	110 TEP	- 2 500 TEP
RN 3 v	160 TEP	140 TEP	- 3 300 TEP
RN 2 v	140 TEP	130 TEP	- 3 100 TEP

On peut aussi estimer, par le calcul des bilans énergétiques actualisés, l'intérêt au point de vue énergétique d'opérations d'investissement, c'est le but des deux exemples qui suivent.

EXEMPLE D'UNE MODIFICATION DE TRACE

RECTIFICATION AU SUD D'ENGAYRESQUE

L'exemple choisi se situe sur la RN.9, entre SEVERAC LE CHATEAU et MILLAU. La route actuelle, longue de 8,5 km, présente un tracé fortement sinueux. Le rayon de courbure maximum est de 200 m, et s'établit, en trois points entre 15 et 35 m.

Les améliorations apportées par le projet résident essentiellement dans la diminution de la sinuosité, l'élargissement de la chaussée et la réduction de longueur de parcours.

	ROUTE ACTUELLE	ROUTE NOUVELLE
Longueur	8,5 km	7,54 km
Largeur	6 m à 6,50 m	7 m sur 3,5 km 2 x 2 voies sur 4 km
Coefficient de visibilité	0,3	0,7
Pente moyenne	4,5%	4,6%
Sinuosité : a	14,7	5,38
Sinuosité : b	1,62	3,55

Résultats du calcul.

	ROUTE ACTUELLE	ROUTE NOUVELLE	VARIATION
Vitesse moyenne VL.	59 km/h	80 km/h	+ 26%
Consommation VL. aux 100 kms	7,62 l	8 l	+ 4,7%
Consommation VL. sur le parcours	0,648 l	0,604 l	- 6,8%
Vitesse moyenne PL.	43,5 km/h	50 km/h	+ 14,9%
Consommation PL. sur le parcours	3,835 l	3,008 l	- 21,6%
Consommation PL. aux 100 kms	45,12 l	39,92 l	- 11,5%
Consommation annuel totale sur le parcours	1 129 000 l	9 86 000 l	- 12,7%

Dans le cas des VL. on note, malgré une forte augmentation de la vitesse moyenne (+ 26%) une consommation en sensible diminution (près de 7%) encore faut-il remarquer que la route nouvelle, compte tenu du relief difficile ne peut pas être considérée comme rectiligne.

Dans le cas des PL., l'effet vitesse jouant moins, la diminution de la consommation est encore plus sensible (- 21,6%).

L'économie de carburant ainsi réalisée atteint 19 000 l/km/an pour un trafic de 3300⁰⁰⁰ véhicules/jour comportant 10% de PL., soit près de 13% de la consommation totale sur le parcours.

Exemple de déviation d'agglomération : SENS.

L'itinéraire V.L. actuel, long de 8,72 km, emprunte sur 1,85 km une voie très commerçante dont la chaussée n'a que 6,40 m de largeur en moyenne.

Le reste de l'itinéraire est commun avec celui des P.L., qui, sur tout son tracé (10,22 km) emprunte des voies de 9 m de largeur ne permettant qu'une voie de circulation dans chaque sens.

La déviation entièrement en rase campagne, est longue de 10,67 km ce qui constitue un allongement de parcours de 22,4% pour les V.L. et 4,4% pour les P.L.

Elle comporte, en 1ère phase, une chaussée de 10,50 m sur 7,4 km et de 7 m sur 3,3 km.

On estime le trafic de transit à 9 000 v/j dont 3500 P.L. (soit près de 40%).

Résultats du calcul.

	Itinéraire actuel	Déviation	Variation
Vitesse V.L.	30 km/h	79,6 km/h	+ 165%
Consommation V.L. aux 100 kms	9,42 l	7,46 l	- 20,8%
Consommation V.L. sur le parcours	0,822 l	0,796 l	- 3,2%
Vitesse P.L.	30 km/h	62,6 km/h	+ 108,7%
Consommation P.L. aux 100 kms	31,2 l	23,4 l	- 25%
Consommation P.L. sur le parcours	3,19 l	2,50 l	- 21,6%
Consommation de car burant en 1 an (trafic de transit)	5 725 400 l	4 791 700 l	- 16,3%

On note que la consommation aux 100 km diminue de plus de 20% pour les V.L. et de 25% pour les P.L.

Malgré un allongement de parcours de plus de 22% pour les V.L., la diminution de la consommation totale de carburant sur le parcours dépasse les 16%.

L'économie annuelle réalisée atteint 87 500 l/km/an pour un trafic de transit de 9 000 véhicules/jour comportant 40% de P.L.

Exemple de la Déviation de Pierre Buffière. -

L'ancienne route (R.N.20) large de 7m en moyenne, présente un tracé particulièrement difficile : franchissement d'une voie ferrée par un "S" comportant deux courbes de 15m de rayon, traversée du bourg de Pierre-Buffière par une pente à 7% et une série de virages de rayon compris entre 40 et 100 m.

La déviation, à 2 x 2 voies sur tout le parcours, permet en particulier par la construction de 2 viaducs pour franchir les vallées, de réduire les pentes et la sinuosité.

Résultats du calcul

	ANCIENNE ROUTE	DEVIATION	VARIATION
Longueur du parcours	4,615	4,004	- 13,2 %
Vitesse V.L.	46,3 km/h	95,5 km/h	+ 106 %
Consommation V.L. aux 100 km	7,56 l	9,17 l	+ 21,3 %
Consommation VL sur le parcours	0,349 l	0,367 l	+ 5,2 %
Vitesse moyenne PL	37,5 km/h	70,5 km/h	+ 88 %
Consommation PL aux 100 km	44,4 l	30,3 l	- 31,8 %
Consommation PL sur le parcours	2,026 l	1,212 l	- 40,2 %
Consommation annuelle sur le parcours	1.420.000 l	1.254.000 l	- 11,7 %

On note une forte diminution de la consommation des P.L. (plus de 40 %) et une légère augmentation de la consommation VL (5%), la vitesse moyenne doublant sur la nouvelle route.

La consommation annuelle de carburant de l'ensemble des véhicules diminue de près de 12% pour un trafic de transit de 7730 v/j comportant 9% de PL, soit une économie de plus de 40 000 l (Km/jour)

Les exemples montrent que l'essentiel des économies réalisées par des opérations de déviation d'agglomération ou de rectification de tracé sont le fait des poids lourds.

Pour les voitures légères, la forte augmentation de la vitesse moyenne annule, dans la plupart des cas, les gains dus à l'amélioration des caractéristiques géométriques (sinuosité, pente) des nouvelles infrastructures.

L'intérêt énergétique de la réalisation d'une opération est donc d'autant plus grand que la proportion de poids lourds sur l'itinéraire est élevée.

Les mêmes questions se posent naturellement en milieu urbain. Seules différeront l'appréciation des consommations urbaines et l'importance, qu'on ne pourra en aucune façon négliger, de l'influence de la circulation (saturation) et de l'induction de trafic qu'impliquent nombre d'investissements en milieu urbain.

On se propose (CETUR) d'établir en particulier le bilan énergétique.

- a) des déviations ou rocades d'agglomération.
- b) des "trémies" P.S.G.R. ou autres aménagements ponctuels.

L'exemple chiffré suivant qui repose sur un cas réel à LYON donnera une idée des ordres de grandeur en jeu pour les déviations.

On considère une traverse constituée de 6400 m de voies larges de banlieue, feux espacés, parfois synchronisés, vitesse moyenne 40 km/h, consommation du véhicule léger moyen 10,5 l/100 km - 2300 m en centre ville de voies étroites et encombrées : moyenne 15 km 14 l/100 km

La traverse est longue de 8700 m et se parcourt en 20 mn moyennant une consommation d'un litre.

Une rocade (projetée) se parcourerait à 80 km/h pour une consommation de 8 l/100.

Si sa longueur est inférieure à 1,5 fois celle de la traverse (13 km) non seulement l'usager gagnera du temps (10 mn au lieu de 20 mn) mais de l'énergie.

Pour le poids lourd la longueur équivalente de rocade est de 22 km (soit 2,5 fois le trajet direct).

Il conviendrait d'ajouter à ce bilan d'avantages le gain résultant de la fluidification en centre-ville et de calculer le B.E.A. de l'opération en fonction de son coût à l'investissement et à l'entretien.

III. 3 Bilan énergétique des opérations d'exploitation.

3.1. Routes interurbaines.

Le cas est en grande partie analogue à celui des déviations d'agglomération.

Il s'agit en effet d'apprécier les consommations totales du trafic qui, dans un cas sont gaspillées dans la circulation trop dense ou complètement saturée, dans l'autre dépendent des allongements de parcours qu'on impose à une partie du trafic sur l'itinéraire bis

Mais alors que les opérations d'investissement exigeaient une mise de fonds énergétique initiale,

le bilan énergétique actualisé des opérations d'exploitation se limite pratiquement au bilan de consommation de carburants : il n'y a pas, ou très peu, de dépenses énergétiques à la mise en place. Tout au plus est-il possible que soient nécessaires des travaux d'aménagements légers sur l'itinéraire bis.

A titre d'illustration prenons un véhicule parcourant sur un itinéraire principal 100 km ; et perdant dans un ou plusieurs bouchons 30 mn soit 2 litres d'essence : c'est la quantité de carburant qu'il dépenserait sur 25 km d'itinéraires sinueux ; le conducteur de ce véhicule peut donc accepter un itinéraire bis de 125 km si il veut équilibrer son bilan énergétique (et dans ce cas son temps de parcours). Si l'on considère, du point de vue de la Collectivité qu'il suffit de délester une partie du trafic pour résorber le bouchon, et le fait que les allongements de parcours sont en fait de 15% en moyenne, le bilan apparaîtra largement positif dans ce cas.

III - 3.2 Plans de circulations

*Les résultats des plans de circulation sont très dépendants des caractéristiques propres de chaque ville : la quantification de ses effets sur les économies d'énergie est donc plus difficile que pour les opérations d'investissements ou d'entretien.

La mise en oeuvre d'un plan de circulation comporte deux phases distinctes.

3.2.1. La mise en place d'un plan de sens uniques et des équipements liés à la séparation des trafics et à la simplification des courants de circulation, conduit à un allongement du parcours moyen et à une augmentation de la vitesse moyenne. Si l'élévation de la vitesse a une conséquence favorable (en effet la consommation varie inversement à la vitesse dans les conditions particulières considérées), l'allongement des parcours consécutifs à la mise en place de sens unique est défavorable.

3.2.2. La mise en place d'une régulation centralisée de trafic susceptible de contribuer à la maîtrise des phénomènes d'induction. La régulation du trafic permet de réduire le nombre des arrêts et le temps passé sur le réseau par l'ensemble des usagers (voir tableau joint) : en effet les plans de feux sont calculés pour minimiser à la fois le nombre des arrêts et le temps passé : les mesures effectuées confirment que les objectifs sont atteints.

La réduction du nombre des arrêts conduit toutes choses égales par ailleurs à une diminution de la consommation. A la diminution du temps passé correspond une augmentation de la vitesse moyenne favorable aux économies d'énergie, en raison de la décroissance de la consommation de carburant en fonction de la vitesse moyenne.

Les équipements de régulation apportent donc une contribution positive aux économies d'énergie.

Cependant les gains de consommation résultant de la mise en place d'une régulation centralisée de trafic, contribuant à la maîtrise des phénomènes d'induction de trafic, s'ils sont positifs sont à l'heure actuelle difficiles à chiffrer avec précision. Pour résoudre cette difficulté, il faut apporter une réponse aux deux questions suivantes :

- comment comparer de manière prévisionnelle, avec une précision acceptable les différents paramètres intervenant dans la consommation des véhicules : longueur des itinéraires, temps total passé sur le réseau, nombre d'arrêt

- quelles sont les normes de consommation en ville, et suivant quelles unités les exprimer ?

Actuellement les outils disponibles ne sont pas bien adaptés pour fournir une solution. Nous analyserons pourquoi et comment compléter et transformer ces outils pour parvenir à une solution.

LES PARAMETRES A MESURER

A) La longueur des itinéraires a bien sûr une incidence directe sur la consommation totale d'énergie sur un réseau. La mise en place d'une régulation centralisée ne peut s'effectuer que si a été réalisé un véritable plan de circulation simplifiant le réseau et les courants de circulation, et répartissant l'usage de la voirie entre les modes. Cette première étape allonge en général les parcours en raison de la multiplication des sens uniques (il est clair cependant que tous les sens uniques ne résultent pas du plan de circulation, la voirie des centre-villes historiques n'a pas été conçue pour les moyens de transports modernes, et ne peut être matériellement utilisée que pour un sens de circulation, qu'il y ait ou non un plan de circulation).

Cependant, il n'est pas justifié d'imputer l'allongement de parcours à la régulation : le plan de circulation poursuit des objectifs divers de fluidité, sécurité et de protection de l'environnement ; la régulation n'intervient que dans un second temps.

Il reste que le plan de sens uniques mis en place et les comportements stabilisés, les systèmes de régulation peuvent induire après coup une deuxième vague de modifications dans les distances de déplacement : certains usagers utilisant, habituellement des itinéraires donnés, pourront préférer après mise en place de la régulation, utiliser un axe coordonné en onde verte permettant des déplacements plus rapides et moins heurtés, même si les trajets sont plus longs.

Villes	Nombre de Carrefours	% de réduction du temps passé sur le réseau	% de réduction du nombre des arrêts
NICE	20	33	55
NANCY	108	15	25
TOULOUSE	35	18	30
LAUSANNE	?	40	10
TORONTO	684	44	53
NEW-YORK	433	20à40	30

- d'autres usagers cherchent avant régulation à éviter un axe principal souvent saturé, par des itinéraires plus longs mais moins encombrés, pourront revenir sur l'axe principal lorsqu'un traitement anti-saturation aura été mis en place.

Ces phénomènes de modification dans les longueurs de déplacement sont mal connus et n'ont pas fait encore l'objet d'études systématiques

Nous considérons que ces deux effets, qui d'ailleurs se compensent partiellement, sont de second ordre par rapport aux conséquences de la mise en place de sens uniques. Aussi les incidences de la mise en place de la régulation centralisée de trafic sur la longueur des déplacements sera-t-elle négligée.

TEMPS REEL TOTAL PASSE SUR LE RESEAU ET NOMBRE D'ARRETS

Ces deux paramètres sont fondamentaux puisqu'ils traduisent l'action essentielle de la régulation du trafic :

" la régulation entraîne une réduction de la dispersion des vitesses des véhicules et une homogénéisation de leur comportement sur le réseau "

La régulation permet de réduire le temps passé par l'ensemble des usagers sur le réseau dans des proportions très variables selon les villes. Ce résultat peut être maintenu si les phénomènes d'induction de trafic sont maîtrisés. En effet, au voisinage des carrefours critiques où apparaît la saturation une action antisaturation par stockage dans des sections réservoirs permet de conserver au carrefour sa capacité optimale et donc d'éviter les situations de paralysie génératrices de pertes de temps et d'énergie.

De plus, au lieu d'avoir un réseau sur lequel les véhicules sont dispersés et avancent par saccades entraînant sans interruption des accélérations, des freinages, des arrêts et des démarrages, la régulation permet d'obtenir un réseau sur lequel les véhicules sont groupés en pelotons et avancent sur des itinéraires à vitesse stabilisée ; les arrêts sont alors plus rares et moins aléatoires et se produisent généralement aux points de rupture de l'onde verte ou dans des tronçons de retenues.

NORMES DE CONSOMMATION

En ce qui concerne les normes de consommation, il apparaît qu'un modèle de consommation d'un véhicule isolé en milieu urbain, ne peut se limiter à exprimer la consommation en fonction de la seule vitesse moyenne, puisqu'une vitesse moyenne peut s'appliquer à deux situations très différentes aussi bien par le mode de conduite que par la consommation des véhicules (cons. au 100 km ou cons. horaire) : il est clair que les freinages fréquents dégagent de la chaleur provenant de l'énergie fournie par le carburant et donc que la vitesse moyenne ne peut à elle seule décrire la consommation du véhicule. lorsqu'on compare plusieurs situations de régulation différentes.

Sur le réseau régulé, la voiture avance à une vitesse stabilisée et s'arrête rarement, la consommation dépend grossièrement de trois facteurs :

- consommation en vitesse stabilisée
- consommation à l'arrêt, au ralenti
- la répartition entre ces deux situations.

En cas de réseau non régulé, la voiture a un comportement plus fluctuant : elle s'arrête fréquemment, peut atteindre des vitesses relativement élevées, la vitesse moyenne ne rend pas compte de la forte dispersion des vitesses pratiquées

Conséquence importante de cette constatation : le procédé d'évaluation de la consommation d'énergie, décrit au paragraphe I.2.3., est satisfaisant à état de régulation donné mais n'est pas de nature à rendre compte de la sensibilité sur la consommation de la mise en place d'une régulation.

En conclusion partielle,

la solution consiste à déterminer

- le volume de circulation passant sur le réseau (exprimé en h. véh ou km. véh) à partir du temps passé sur le réseau, du nombre de véhicules en circulation et de la longueur de la voirie
- la nature du trafic, saturé ou fluide à partir du nombre d'arrêts moyen par kilomètre sur les différents tronçons
- une norme de consommation permettant de passer de ces éléments à la consommation totale.

A partir de ces paramètres mesurés ou prévus, il sera possible de déterminer la consommation totale des véhicules sur le réseau dans les différentes configurations de plans de circulation et de régulation associée.

COMMENT DEVELOPPER LES OUTILS EXISTANT POUR ATTEINDRE CETTE SOLUTION ?

Pour appliquer la méthode il faut disposer des deux outils indispensables

- l'un déterminant les paramètres de trafic "volume" et "nature" il peut être obtenu à partir de programmes existants (TRANSYT-THESEE) permettant de calculer les plans de feux dans les systèmes de régulation centralisée. La fonctionnelle qu'ils cherchent à minimiser par itération, est calculée à partir du nombre d'arrêts et du temps total passé sur le réseau, soit sur l'ensemble du réseau (TRANSYT), soit sur chacun des tronçons (THESEE) Il peut être envisagé que le nombre d'arrêts et le temps total prévisibles soient "sortis" par l'ordinateur à quelconque stade de l'itération.

Il convient de noter qu'à l'heure actuelle les programmes disponibles TRANSYT et THESEE ne s'appliquent qu'en dehors de la période saturée. Cette lacune sera comblée en 1980 par le programme "THESEE 80". Développé suivant les mêmes principes de base, il pourra estimer le nombre d'arrêts et le temps total des parcours en situation saturée.

Le S.E.R.E.S. a saisi le CETUR afin qu'il étudie la possibilité d'intégrer sur les programmes existants et surtout le programme THESEE 80 des programmes périphériques permettant d'évaluer les grandeurs de trafic indispensables aux calculs de consommation et aussi les économies d'énergie entre la situation initiale et la situation finale en période régulée pour chacun des plans de feux. Pour obtenir les économies d'énergie, il est nécessaire de disposer d'un deuxième outil extérieur au programme.

- des normes de consommation adaptées à la situation urbaine. Si sont connues avec une bonne précision les consommations d'un véhicule de gamme moyenne en l'absence de départ à froid, en fonction de la seule vitesse stabilisée, la consommation en situation "anarchique" à vitesse non stabilisée est encore mal connue

Ce point devra être développé : en d'autres termes, pour comparer valablement du point de vue énergétique les situations avant et après régulation, il faudrait disposer d'un modèle donnant la consommation en fonction de deux variantes : 1) la vitesse moyenne 2) le nombre d'arrêts à l'unité de distance

III.4 - Bilan énergétique d'une politique libérale de report modal.

Nul ne songe à contester que le véhicule particulier actuel est très mal adapté à la circulation urbaine :

D'où l'idée que le transfert de la voiture particulière vers le transport en commun est générateur d'économies énergétiques.

Une analyse approfondie de ce problème ne peut cependant pas se limiter à la simple règle de soustraction :

1 déplacement V.L. = 0,4 litre/personne
 1 déplacement bus = 0,1 litre/personne
 gain/personne = 0,3 litre/personne

Les deux modes ayant une certaine rigidité, c'est à la marge qu'il convient de faire la comparaison.

Nous partirons pour ce faire de la relation entre l'offre et la demande en Transport en Commun.

$$e = \frac{\Delta V}{V} / \frac{\Delta L}{L}$$

V nombre de voyageurs
 L nombre de bus x km

valable

Cette relation n'est qu'à structure tarifaire (carburant/bus) donnée, et que si l'on considère qu'aucune mesure autoritaire de restriction de circulation, de stationnement, de rationnement de carburant n'oblige un report forcé.

Elle exprime le fait que, si l'on laisse l'usager libre de son choix, et si on n'en modifie pas le coût pour lui, on ne peut l'attirer vers le transport en commun qu'en augmentant le nombre et la fréquence des lignes de bus, et en acceptant donc éventuellement une diminution de l'occupation des véhicules.

Sous ces hypothèses, auxquelles il convient de se référer explicitement avant de conclure ce qui suit, il apparaît (cf rapport IRT CETUR annexe) que, pour transférer un conducteur V.L. vers le T.C. (le passager V.L. n'a aucun intérêt énergétique), il faut consommer :

$$c' = \frac{a C}{ep}$$

où $\frac{1}{a}$ est la probabilité d'apparition d'un conducteur V.L. parmi les passagers d'un bus ($a = 6$)

C la consommation spécifique du bus ($C = 0,4 \text{ l/km}$)

e l'élasticité entre l'offre et la demande T.C. dépendant de la configuration de la ville du réseau T.C. ($e = 0,9$)

$p = \frac{V}{L}$ le ratio d'exploitation caractéristique du réseau ($p = 4$)

On obtient pour l'exemple chiffré proposé

$$C' = 0,66 \text{ l}$$

Cette consommation est supérieure à celle d'un V.L. ($0,14 \text{ l/km}$).

Il ne convient pas de tirer d'autres conclusions de cet exemple chiffré que l'indication qu'une opération de promotion libérale des transports en commun ne présente pas toujours un bilan énergétique de fonctionnement globalement favorable.

Il apparaît, en ce qui concerne notre groupe, essentiel d'étudier très précisément les phénomènes de transferts en fonction des différents critères explicatifs.

III-5 - Bilan Énergétique de l'entretien. -

65. -

La question qui est posée dans ce paragraphe aurait pu être examinée au chapitre de l'investissement.

Il s'agit d'une part de choisir, entre les variantes de structures de chaussées que propose, pour un trafic et une classe de sol donnés, le catalogue des structures, celle qui présente le meilleur B.E.A. (Bénéfice énergétique actualisé) compte tenu des charges énergétiques d'entretien déterminés au I 3:1. Une telle question peut être facilement résolue, dans la mesure où ces dépenses d'entretien sont considérées comme valables.

Cette réserve faite, le tableau suivant traduit le bilan énergétique de la construction d'une route à 2 voies et des séquences d'entretien ultérieures.

T.E.P. par kilomètre

Classes de trafic	Structures Qualité du sol	T.E.P. par kilomètre			
		Béton	Grave laitier	Mixte	Tout bitume
PF 1 Total Général		:296,1 - 477,7	:544,5 - 615,6	:602,6 - 697,4	:737,7 - 832,5
Total hors bitume		:181,4 - 226,8	:148 - 161	:148 - 166	:167 - 192
PF 2 Total Général		:297,6 - 470,1	:539,8 - 610,9	:553,0 - 647,8	:688,0 - 782,6
Total hors bitume		:188,8 - 218,5	:143 - 156	:154 - 173	:159 - 184
PF 1 Total Général		:296,7 - 488,2	:457,5 - 528,6	:531,3 - 602,4	:688,0 - 759,1
Total hors bitume		:163,6 - 207,7	:128 - 142	:151 - 165	:159 - 173
PF 2 Total Général		:288,9 - 432,1	:448,0 - 523,5	:526,1 - 596,3	:636,1 - 707,2
Total hors bitume		:158,9 - 203,3	:119 - 137	:146 - 159	:148 - 162

IV. - 1. Calculs de rentabilité

IV. - 1.1 - Valorisation du coût de l'énergie.

L'introduction des contraintes d'économies d'énergie dans les calculs de rentabilité des investissements routiers doit être naturellement recherchée : cette contrainte est en effet amenée à devenir de plus en plus pertinente mais, comme elle ne doit pas être seule à être en cause, il n'est ni satisfaisant ni éclairant pour la décision de ne pas essayer de la pondérer par rapport aux autres critères déterminants.

Plusieurs valorisations sont envisageables.

a) La valorisation directe par le prix d'achat à l'étranger des produits pétroliers bruts ou finis intervenant dans l'investissement ou l'usage routier conduit à un double compte puisque ces dépenses sont déjà incluses dans l'estimation du coût de l'investissement ou des consommations de carburants.

b) La surtaxation des carburants est considérée comme un transfert pour l'Etat et donc n'intervient pas dans le bilan. On pourrait envisager de considérer qu'elle correspond au moins en partie au prix de la dépendance et de l'incertitude.

Un telle approche n'est pas très satisfaisante, dans la mesure où il est évident que la surtaxation est utilisée par l'Etat pour de tous autres emplois, et où seule une partie de ces recettes (qu'il conviendrait dans la pratique de déterminer) devrait être retenue.

c) La prise en compte de taux fictif de la devise ou de coût du risque semble plus satisfaisante.

Mais, il est évident, qu'une prise en compte micro économique de ces grandeurs ne pourrait nullement correspondre aux mécanismes du marché des produits pétroliers : il n'y a en effet aucune raison pour considérer que le baril n'est pas acheté ou vendu au prix que détermine l'état de ce marché.

Il est donc nécessaire, pour appréhender ces prix fictifs, d'entreprendre une incursion dans la macroéconomie.

Nous nous appuyerons, pour ce faire, sur "l'essai d'évaluation macroéconomique de la politique de l'énergie" développé par la Direction de la Prévision et joint en annexe.

La théorie met en évidence que le choix entre investissements énergétiques est affecté, non seulement par les prix de revient des productions marginales, mais encore par :

- les contraintes d'équilibres extérieures
- la substituabilité des différents biens économiques
- les contraintes externes d'environnement (nucléaire)
- les aléas de production
- l'incertitude sur les prix des importations d'énergie.

Ces contraintes sont explicitées par divers indicateurs explicatifs; en particulier, pour ce qui nous intéresse, par un taux fictif de la devise (rapport entre les prix duaux des importations et de la production nationale), dont la prise en compte doit assurer, eu égard aux contraintes extérieures, l'optimisation des ressources productives, et par une prime de risque (écart entre le prix sûr et le prix possible de l'énergie)

Nous ferons l'hypothèse que ces considérations peuvent s'appliquer à l'investissement routier (alors supposé investissement productif en énergie).

Dans des conditions moyennes de l'économie française et en supposant que les risques sur le prix des importations seront élevés (plus ou moins 30% avec une probabilité de 1/3 - écart type 24,5%) on retiendra :

- un taux fictif de la devise $\tau = 1,15$
- une prime de risque $r = 5\%$.

IV. 1.2 Application aux calculs de rentabilité des opérations d'investissement en Rase Campagne. -

1) Le calcul de la consommation se fera comme indiqué en I. 2.4.

2) La consommation des véhicules sera prise en compte dans les coûts de circulation, comme auparavant, les trafic et les consommations unitaires étant ceux indiqués en III. 1.1.

3) Sera ajouté au bénéfice actualisé une quantité égale au B.E.A. (bénéfice énergétique actualisé exprimé en Francs) multiplié par 0,20.

$$\left((1 + r)^n - 1 \right)$$

A titre d'exemple nous avons déterminé la rentabilité des opérations examinées ci-dessus (SENS et Engayresque).

L'objet du calcul effectué est de mesurer la sensibilité du taux de rentabilité à la variation du coût de circulation, due à une meilleure prise en compte de la consommation et non de "sortir" une nouvelle rentabilité valable, ce calcul devant être fait avec des valeurs cohérentes et actualisées. Les nouvelles consommations calculées sont évaluées; dans le cas de SENS aux coûts de 1970, dans le cas d'ENGAYRESQUE aux coûts de 1974, et affectées d'un coefficient multiplicateur égal à 1,2, destiné à valoriser le coût de l'énergie.

TAUX DE RENTABILITE

	Ancien calcul	Nouveau calcul
SENS	24,77 %	26,43 %
ENGAYRESQUE	10,59 %	10,46 %

Les résultats montrent que le nouveau calcul ne modifie pas d'une manière très importante le taux de rentabilité mais qu'il le pondère cependant de manière non négligeable.

IV. - 1.3. Application aux calculs de rentabilité des opérations d'exploitation de la route.

Le calcul économique devra être développé dans le même sens pour les opérations d'exploitation de la route.

IV. - 2. Recommandations pour l'élaboration des projets

Le bilan économique intégrant les considérations énergétiques devrait rendre compte, pour les opérations auxquelles il pourra s'appliquer, de l'ensemble des contraintes quantifiables à retenir et sera donc de nature, pour ces critères, à indiquer la meilleure solution.

Cependant, d'une part le calcul économique ne s'applique pas à toutes les opérations et d'autre part, quand il s'applique, il exclut certains critères.

Aussi, les considérations qualitatives doivent être développées pour mettre à jour certains effets pervers non quantifiés de la recherche d'économie d'énergie, et les mettre en balance avec les gains attendus. Il en sera ainsi:

2.1 Des plans de circulation. -

La rentabilité d'un plan de circulation est: d'une part difficile à établir, d'autre part très sectorielle, puisque ne faisant pas intervenir les effets "indirects" sur la qualité de la vie dans l'agglomération, son organisation....

On a par ailleurs vu que la minimisation des dépenses énergétiques pouvait, en minimisant les parcours moyens, appeler une induction certaine.

Inversement le souci de protection des centres-ville peut amener à élaborer un plan de circulation allongeant les parcours.

La prise en compte du facteur économie d'énergie devait être faite systématiquement lors de l'élaboration des plans de circulation.

2-2 Le report modal

Il en est de même, souvent dans un cadre identique, de l'intérêt du report modal dont on a vu que le bilan énergétique devait être apprécié de façon sérieuse.

2-3 L'éclairage

D'un point de vue énergétique, la réduction de l'éclairage présente un intérêt certain, toutefois il faut tenir compte d'éléments susceptibles d'être intégrés au bilan général de l'éclairage. Ainsi :

- l'éclairage rend la circulation plus fluide la nuit, et à ce titre il fait économiser le carburant.
- l'éclairage permet de rouler/anternes au lieu d'allumer les phares, ce qui conduit également à une économie de carburant.
- hormis ces avantages relevant du domaine énergétique, il ne faut pas oublier que l'implantation de dispositifs d'éclairage se justifie actuellement uniquement pour améliorer la sécurité des usagers.
- l'éclairage a un impact notable sur le confort de conduite et sur les temps de parcours.
- sur le plan du coût de fonctionnement des véhicules, il faut prendre en compte également l'économie de pneumatiques résultant d'une conduite plus fluide et l'économie d'ampoules de phares.

Ces différents avantages n'ont pu tous être évalués; cependant un calcul de rentabilité (développé en annexe) prend en compte ceux pour lesquels une première valorisation a été faite

Ces calculs justifient les règles de programmation édictées par la circulaire RIP.1.C. du 25 avril 1974 et par les circulaires annuelles d'équipement de la route de rase campagne d'une part et des Autoroutes non concédées d'autre part.

Dans les conditions actuelles, il n'y a pas lieu de modifier ces règles de programmation portant sur les équipements neufs à venir. En revanche, en ce qui concerne les investissements supplémentaires portant sur les matériels d'éclairage existants, il convient de souligner que, seuls, les investissements rentables pourront être financés et que les plus rentables devront être financés en priorité. Il est indispensable que le critère de rentabilité appliqué pour l'éclairage soit identique à celui retenu par l'Agence pour les Economies d'Energie pour l'octroi de subventions à l'Industrie, aux Ménages pour la réalisation d'équipements visant à économiser l'énergie. En effet, toute différence entre les deux critères de rentabilité aurait pour conséquence d'établir des distorsions dans l'allocation des ressources conduisant à financer des opérations moins "rentables" que d'autres ne pouvant être financées par manque de crédits.

A partir de l'hypothèse de conversion 1 Tep = 4000 kwh, un investissement est considéré comme rentable si, en économies immédiates, son coût initial est inférieur à 5000 F/Tep économisée tous les ans.

Le Groupe de travail "Eclairage Public" présidé par M. GAUDEL pourra éventuellement édicter de nouvelles règles pour l'établissement de calculs de rentabilité intégrant ces critères.

V Conclusions et suites à donner

Sur les 107 millions de Tep de pétrole importés par la Nation en 1978, 28 millions ont été consacrés à l'activité routière.

La part des carburants représente à elle seule 25 millions de Tep et constitue donc l'enjeu le plus important et, en outre, le moins substituable.

Par ailleurs sur les 3 millions de Tep qui fournissent l'énergie de la construction, de l'entretien et de la gestion, le bitume, dont on a maintes fois souligné la spécificité, représente 1,65 millions de Tep soit plus de la moitié.

Les scénarios développés pour traduire l'évolution souhaitable des dépenses énergétiques misent sur un maintien du volume des importations pétrolières (106 millions de Tep en 1985) dans l'hypothèse d'une croissance économique soutenue (4,5%) voire sur une diminution (97 millions de Tep) pour une croissance de 3%.

De tels scénarios supposent des économies énergétiques respectivement de 35 ou 25 millions de Tep d'ici 1985.

La part pétrolière du secteur transport devrait alors représenter 42 millions de Tep ou 40 millions de Tep en 1985. Ce qui correspond à des économies par rapport aux tendances naturelles de pétrole pour le secteur des transports de 5 millions de Tep ou 3 millions de Tep selon les hypothèses de croissance économique.

Il n'est pas question de comparer sans précautions ces économies attendues à un horizon très précis avec celles que nous avons évoquées, et qui correspondent à des projections idéales dont la réalisation ne peut se situer que dans le long terme.

Cette marge représente 5,5 millions de Tep/an.

Elle représente une élasticité pouvant être considérée comme maximale et suppose que le trafic est constant.

Les économies à rechercher dans la construction et l'entretien sont du même ordre de grandeur (400 000 Tep) et correspondent d'une part à un abandon aussi complet que possible des produits noirs, d'autre part à la rationalisation optimale des opérations (fabrication-éclairage...). Si la première démarche peut appeler un certain nombre d'objections (spécificité du bitume, faisabilité, intérêt technico-économique), et doit sans doute être limitée à la limitation de l'emploi du bitume dans les structures "noires" et au développement de potentialités pour les structures blanches à mettre en oeuvre en cas de pénurie grave, la seconde, en revanche, ne peut entraîner que des effets bénéfiques. Il convient donc de développer les procédés qui pourront permettre de construire et d'exploiter la route de façon la plus économique possible.

L'enjeu relatif à l'usage de l'infrastructure est d'un tout autre ordre de grandeur puisque le domaine économisable se situe aux environs de 4,7 millions de Tep/an.

Les gains de consommations à espérer de l'amélioration des véhicules eux-mêmes sont de l'ordre de 3 millions de Tep et traduisent une évolution portant certes sur l'intégralité du parc mais ne supposant aucune révolution. L'objectif d'un rendement des véhicules inférieur de 12% aux rendements actuels qui sous-tend ce résultat semble en effet techniquement à la portée des constructeurs et implique principalement le développement et l'industrialisation de solutions existantes.

L'obtention du million de Tep économisable par l'optimisation des conditions de conduite et d'entretien est sans doute plus aléatoire parce que plus liée aux comportements individuels. L'enjeu est cependant suffisamment important pour que les campagnes d'information et d'incitation actuellement menées trouvent leur justification et soient poursuivies. Il est d'ailleurs sans doute supérieur au chiffre annoncé puisque celui-ci s'applique à un parc de véhicules du futur pour lequel conduite et entretien auront un impact inférieur à celui qu'on peut estimer valable pour les voitures actuelles.

Les deux derniers moyens propres à réduire les consommations du trafic routier le sont dans une moindre mesure, quelques centaines de milliers de Tep/an. Ils doivent cependant retenir, toute notre attention.

La réglementation tout d'abord, car cette méthode contraignante, et qui n'est pas sans effets pervers, se solde par un résultat qui, s'il n'est pas négligeable, est à mettre en regard des précédents; une limitation généralisée à 80 km/h sur route et 120 km/h sur autoroute entraîne, compte tenu d'un taux de désobéissance inéluctable, 400 000 Tep d'économies par an. L'amélioration des véhicules est susceptible d'en économiser 3 millions.

L'impact de la construction routière estimé globalement et plus artificiellement est sans doute plus modeste. Encore faut-il noter qu'il représente les économies résultant des programmes d'investissements, tels qu'ils sont actuellement réalisés, et qu'il ne tient donc pas compte d'une augmentation du volume ou d'un redéploiement dans la nature de ces travaux et qu'enfin c'est une moyenne d'effets cumulatifs d'investissements sur 20 ans. N'ont, par ailleurs, pas été inclus dans ce total les effets des opérations d'exploitation urbaines ou de rase campagne, qui ne sont pas négligeables mais dont le chiffrage global est, dans l'état actuel des études, délicat.

Il n'en reste pas moins vrai que ce chiffre met en évidence le fait que la construction de routes adaptées, loin d'être une source de gaspillage énergétique que d'aucuns dénoncent, peut apporter au contraire des économies de pétrole non négligeables.

L'outil forgé par le Groupe de travail doit ainsi permettre d'évaluer, pour chaque projet d'investissement routier, le bilan énergétique de l'opération, en comparant l'équivalence énergétique de la construction et de l'entretien aux gains éventuels de consommation du trafic que peut permettre l'infrastructure.

Il n'est évidemment pas possible de tirer des conclusions universelles à partir des quelques cas concrets développés dans ce rapport.

Certains enseignements semblent toutefois pouvoir être soulignés.

La mise de fonds énergétique nécessaire à la construction routière est modeste vis à vis de la consommation du trafic : un kilomètre d'autoroute représente environ quatre ans de dépense en carburants du trafic qu'il supporte et la part du bitume est par ailleurs prépondérante dans ce bilan.

La consommation des véhicules est très sensible aux caractéristiques de la route : sinuosité, pente, conditions de circulations.

L'amélioration de ces caractéristiques par des investissements adaptés (rectifications de virages, écrètements, déviations) est donc susceptible de réduire d'une façon significative les consommations, d'autant qu'elle s'accompagne dans bien des cas d'une réduction de longueur.

Les exemples décrits dans le rapport montrent que si l'augmentation des vitesses qu'autorisent ces nouvelles infrastructures rend, pour les véhicules légers, le bilan à peu près neutre, en revanche les consommations du trafic Poids Lourds sont significativement réduites.

Enfin, entre plusieurs variantes d'un même projet il apparaît, en première analyse, que le choix d'une vitesse de référence élevée permet d'obtenir un bilan énergétique favorable.

Il n'est certes pas question de prétendre que tous les investissements routiers présentent un bilan énergétique favorable.

Au demeurant il est parfaitement légitime qu'une opération routière conçue pour procurer à la Collectivité des avantages de toute autre nature (temps et sécurité) puisse entraîner une surconsommation énergétique acceptable : tel semble être le cas des autoroutes.

Il convient cependant dans ce cas de faire peser ces dépenses énergétiques d'un poids suffisant pour qu'elles soient justifiées par les avantages retirés par la Nation de cet investissement.

C'est la raison pour laquelle nous nous sommes efforcés d'intégrer le bilan énergétique dans le calcul de rentabilité des investissements routiers, non seulement pour prendre mieux en compte le caractère spécifique des dépenses dans ce domaine mais aussi pour dégager les opérations les plus rentables selon ce critère.

La refonte dans ce sens des calculs de rentabilité actuellement en vigueur constituent donc notre première proposition.

Toutes les opérations routières ne peuvent cependant faire l'objet d'un tel calcul, soit que la rentabilité ne puisse en être établie, soit que les modèles de consommation ne permettent pas encore d'établir valablement un bilan énergétique.

Pour ces opérations, outre les recommandations générales concernant les économies d'énergie, il convient de développer des études nécessaires à une meilleure prise en compte du facteur énergie.

1) Modèles de consommation des véhicules.

Il convient tout d'abord de noter que les modèles développés dans ce rapport ne constituent sans doute qu'une première approche des phénomènes, et qu'ils devront dans l'avenir être affinés et précisés afin de mieux rendre compte des consommations réelles.

Sont en particulier à prendre en considération les incidences des conditions de conduite et d'entretien des véhicules. Sont également à intégrer les effets "conditions de circulation" (remise en vitesse), mal appréhendés actuellement.

Des études plus approfondies sont nécessaires pour définir les modèles concernant :

- le milieu urbain et l'influence de la régulation
- la circulation non fluide
- les poids lourds

2) Méthodologie d'établissement du bilan énergétique

On a développé pour les opérations d'investissement un calcul du B.E.A. opérationnel.

Une démarche analogue est à entreprendre pour :

- les plans de circulation

L'aboutissement pourrait être une méthodologie de comparaison des variantes d'organisation de la circulation, lors de la première phase des plans de circulation, et d'autre part la mise au point de programmes de calcul de plans de feux de régulation centralisée de trafic (plans de feux dont l'objectif serait les économies de carburant).

-les structures de chaussées et l'entretien qu'elles impliquent. Dans ce domaine une réflexion exhaustive devrait être menée, portant sur l'intégralité de la vie de la chaussée pour optimiser le couple structure-entretien.

L'aboutissement pourrait en être un catalogue des structures, intégrant la composante énergétique.

- les opérations urbaines d'investissement, dont la spécificité exige une démarche particulière.

3) Innovation.

La recherche et l'expérimentation de techniques nouvelles dans les domaines de la construction routière et du véhicule doivent être développées.

Il s'agit de développer des techniques de recyclage des enrobés, d'enrobés en couches minces, d'emploi des enduits.

Le principal enjeu en termes d'économies se situe dans l'amélioration des véhicules eux-mêmes. La recherche de véhicules plus sobres s'impose plus que jamais.

Banaliser dans les calculs de rentabilité routière les dépenses pétrolières, en les chiffrant uniquement par leur prix, ne peut plus rendre compte de la spécificité qui s'y attache. Il convenait donc par une approche particulière d'intégrer la préoccupation d'économie d'énergie dans le domaine de la route. Les travaux du groupe de travail posent, nous semble-t-il, les premiers jalons nécessaires à l'établissement d'un compte énergétique pour les opérations routières. Aussi imparfait et partiel que puisse être l'outil, proposé ainsi au projeteur et au décideur, il doit permettre une première intégration de la composante énergétique dans les études et les choix.

Mais un tel travail peut être aussi, et c'est sans doute le principal, l'occasion d'une prise de conscience de la sensibilité des consommations du trafic aux caractéristiques des infrastructures et à leur exploitation et, s'il permettait simplement de déclencher le "réflexe énergie" lors de l'élaboration des projets routiers de quelque nature qu'ils soient, on pourrait considérer qu'un premier but a été atteint.

Tableau des Economies Théoriques Maximales

Dépenses	Economies théoriques maximales
<u>Construction.</u> -	
820 000 Tep/an	:abandon structures noires :pour la construction :neuve
	: 300 000 tep de bitume
dont 520 000 Tep de bitume	amélioration procédés
	: 50 000 tep
	: 350 000 Tep dont 300 000 bitume
<u>Usage.</u> -	
25 millions de Tep/an	:construction infrastruc- :tures
	: 130 000 Tep/an
	:amélioration véhicules
	: 3 millions Tep/an
	:conditions de conduite
	: 1,25 millions Tep/an
	:règlement 80-120 km/h
	: 400 000 Tep/an
	: 4,78 Millions Tep/an
<u>Gestion.</u> -	
<u>Entretien</u>	
1 400 000 Tep/an	:Rationalisation de :l'entretien
	: 140 000 Tep/an
<u>Eclairage</u>	
650 000 Tep/an	: 300 000 Tep/an
<u>Feux de signalisation</u>	
80 000 Tep/an	
<u>Total =</u> 2 140 000 Tep/an	: 440 000 Tep/an
<u>Total gén. =</u> 27 960 000 Tep/an	T O T A L 5, 570 Millions Tep/an

A N N E X E S :

- La consommation d'énergie dans la construction et l'entretien des infrastructures routières SETRA-DLI
- Amélioration du modèle de prévision de la consommation de carburant par les véhicules légers en Rase Campagne I.R.T.CERNE
- Influence des pentes sur la consommation de carburant des véhicules légers + additif I.R.T.CERNE
- Energie et transports en Milieu Urbain I.R.T.CETUR
- Essai d'évaluation macroéconomique de la politique de l'énergie D.P.MEF
- Etude sur la détermination des équivalences énergétiques de différentes structures routières SETRA
- Eclairage et économies d'énergie SERES
- Exploitation et saturation en milieu urbain SERES
- Calcul de la consommation des véhicules dans les cas d'ENGAYRESQUE, SENS et PIERRE-BUFFIERE DROR