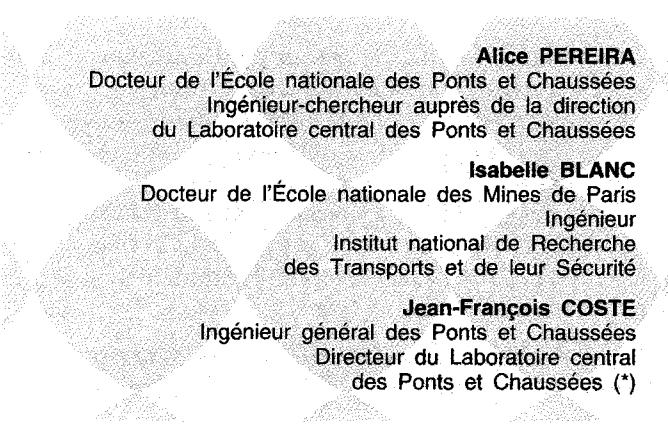


La consommation énergétique globale des infrastructures autoroutières

Contribution à l'analyse du cycle de vie



Alice PEREIRA
Docteur de l'École nationale des Ponts et Chaussées
Ingénieur-chercheur auprès de la direction
du Laboratoire central des Ponts et Chaussées

Isabelle BLANC
Docteur de l'École nationale des Mines de Paris
Ingénieur
Institut national de Recherche
des Transports et de leur Sécurité

Jean-François COSTE
Ingénieur général des Ponts et Chaussées
Directeur du Laboratoire central
des Ponts et Chaussées (*)

RÉSUMÉ

Cette étude est développée dans le cadre de l'établissement d'une analyse globale des impacts sur l'environnement des infrastructures autoroutières. L'objectif est d'aller au-delà du cadre habituel d'évaluation des impacts en cours de construction et de mise en service de l'ouvrage. Pour cela, on s'appuie sur l'analyse du cycle de vie. Cette étude s'est portée sur la comparaison de variantes autoroutières (avant-projet sommaire).

L'analyse du cycle de vie (norme NF X 30-300) repose sur une méthodologie d'appréciation des impacts au cours du cycle de vie d'un ouvrage : construction, utilisation, entretien. Concernant la phase d'utilisation des infrastructures, leur durée d'exploitation a été fixée à cinquante ans.

On examine plus particulièrement la consommation énergétique globale. Cette consommation a été estimée pour les terrassements, les ouvrage d'art, les chaussées et leur entretien, le fonctionnement des tunnels, et la circulation de véhicules au cours de cinquante ans. Différents scénarios relatifs à l'évolution du trafic ont été pris en compte.

MOTS CLÉS : 15 - Autoroute - Étude d'impact (environnement) - Durée de vie - Consommation d'énergie - Protection de l'environnement - // Cycle de vie.

Introduction

L'évaluation d'un projet d'infrastructure routière du point de vue de l'environnement couvre des domaines très variés et la prise en compte de la totalité d'entre eux s'avère encore actuellement difficile. L'environnement, dans ce cas, est pris au sens large. De nombreux aspects sont concernés : de l'effet de coupure à la beauté du paysage, en passant par la flore, la faune, l'air, l'eau, etc. L'évaluation des impacts entre dans la logique de l'analyse globale des impacts telle qu'elle est prévue par la législation depuis 1982 (Loi d'orientation des transports intérieurs). Ce type d'analyse permet d'évaluer le projet en fonction de différents niveaux d'intérêt socio-économique et d'effectuer ainsi des choix plus rigoureux.

Actuellement, la recherche d'une évaluation globale se heurte à des difficultés méthodologiques relatives à l'appréciation des impacts, d'une part, à long terme et, d'autre part, à une échelle spatiale plus vaste que celle relative à la stricte infrastructure. On propose une approche basée sur la notion d'analyse du cycle de vie. Cette méthodologie, employée dans l'industrie, a été adaptée aux infrastructures autoroutières. L'analyse du cycle de vie présente une démarche structurée permettant une évaluation des impacts potentiels au cours de la vie de l'infrastructure.

(*) Jusqu'au 27 février 1997, actuellement Secrétaire général de l'Association internationale permanente des congrès de la route (AIPCR).

Cette approche est testée sur un cas concret de comparaison de variantes d'un tracé autoroutier. Différents facteurs d'impact sont pris en compte lors de l'analyse du cycle de vie de l'infrastructure. On illustrera cette approche en examinant plus particulièrement l'évaluation de la consommation énergétique globale.

Analyse du cycle de vie

L'analyse du cycle de vie est un outil d'évaluation des impacts sur l'environnement d'un système comprenant l'ensemble des activités associées à un produit ou à un service, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination des déchets. La norme française NF X 30-300 (AFNOR, 1996) et le projet de la norme ISO 14040 définissent les phases principales d'une analyse du cycle de vie.

- **La définition des objectifs et du champ d'étude.** L'objectif cerne le problème posé et envisage les applications de l'analyse. Le champ d'étude définit le domaine d'application de l'analyse du cycle de vie, en précisant l'unité fonctionnelle, les frontières du système, les types d'impact, la qualité des données, etc.
- **L'inventaire** répertorie et quantifie les flux de matières et d'énergie entrant et sortant du système défini. Ces flux et tout ce qui peut provoquer un impact sont appelés facteurs d'impact.
- **L'évaluation de l'impact du cycle de vie** consiste à évaluer la portée des impacts potentiels sur l'environnement, provoqués par les flux (facteurs d'impact) recensés dans l'inventaire.
- **L'interprétation du cycle de vie** est la phase au cours de laquelle les résultats de l'analyse de l'inventaire et de l'évaluation des impacts sont combinés sous forme de discussions et de conclusions.

Objectif

L'objectif de cette étude est l'application de l'analyse du cycle de vie à la comparaison de variantes d'un tracé autoroutier. Cette application permettra d'identifier les apports d'une telle approche pour l'évaluation globale des impacts.

Durée de vie

L'analyse du cycle de vie doit être effectuée au cours de la durée de vie de l'infrastructure. Cependant, les infrastructures autoroutières n'ont pas une durée de vie déterminée. La durée de vie utilisée dans cette analyse du cycle de vie est alors une durée de référence.

Selon l'orientation du ministère chargé de l'Équipement et des Transports, l'évaluation socio-économique des projets d'infrastructures routières nécessite une perspective à très long terme, souvent supérieure à trente ans (MATET, 1995). Notre proposition est de considérer une durée de référence de cinquante ans. Celle-ci est souvent prise comme référence pour le domaine des transports. Elle correspond, en effet, à une période pendant laquelle l'usage de l'infrastructure ne s'écartera pas très sensiblement des fonctions qui lui ont été dévolues à l'origine.

Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle est une référence à la fonction du système ; référence à laquelle les facteurs d'impact sont liés. La fonction du système étudié est le transport de véhicules d'un point à un autre. L'unité associée à cette fonction est le nombre de véhicules circulant au cours de la période de cinquante ans. La comparaison des résultats de l'analyse du cycle de vie des variantes d'une infrastructure autoroutière s'effectue selon cette unité fonctionnelle.

Frontière du système

La frontière définit le système à l'intérieur duquel les flux seront recensés. Les flux hors du cadre dans la figure 1 sont négligés. Le système couvre la période de construction, d'utilisation et d'entretien de l'infrastructure autoroutière.

Inventaire

L'inventaire des flux (facteurs d'impact) traversant la frontière du système couvre le cycle de vie de l'infrastructure (durée de référence de cinquante ans). Une étude complète a été réalisée sur l'ensemble des facteurs d'impact (Pereira, Blanc et Coste, 1996). À titre d'illustration, on présente les résultats obtenus sur un seul indicateur synthétique : la consommation énergétique. Il s'agit donc d'inventorier tous les flux de consommation énergétique au cours de cinquante ans d'exploitation de l'autoroute.

Description du site

Les trois variantes sur lesquelles s'appuie cette étude correspondent à un tronçon d'environ 10 km d'une autoroute qui a fait l'objet d'un avant-projet sommaire étudié par le CETE Méditerranée en 1993. Le tableau I montre leurs principales caractéristiques techniques. Le viaduc de la deuxième variante est suivi d'un mur de soutènement.

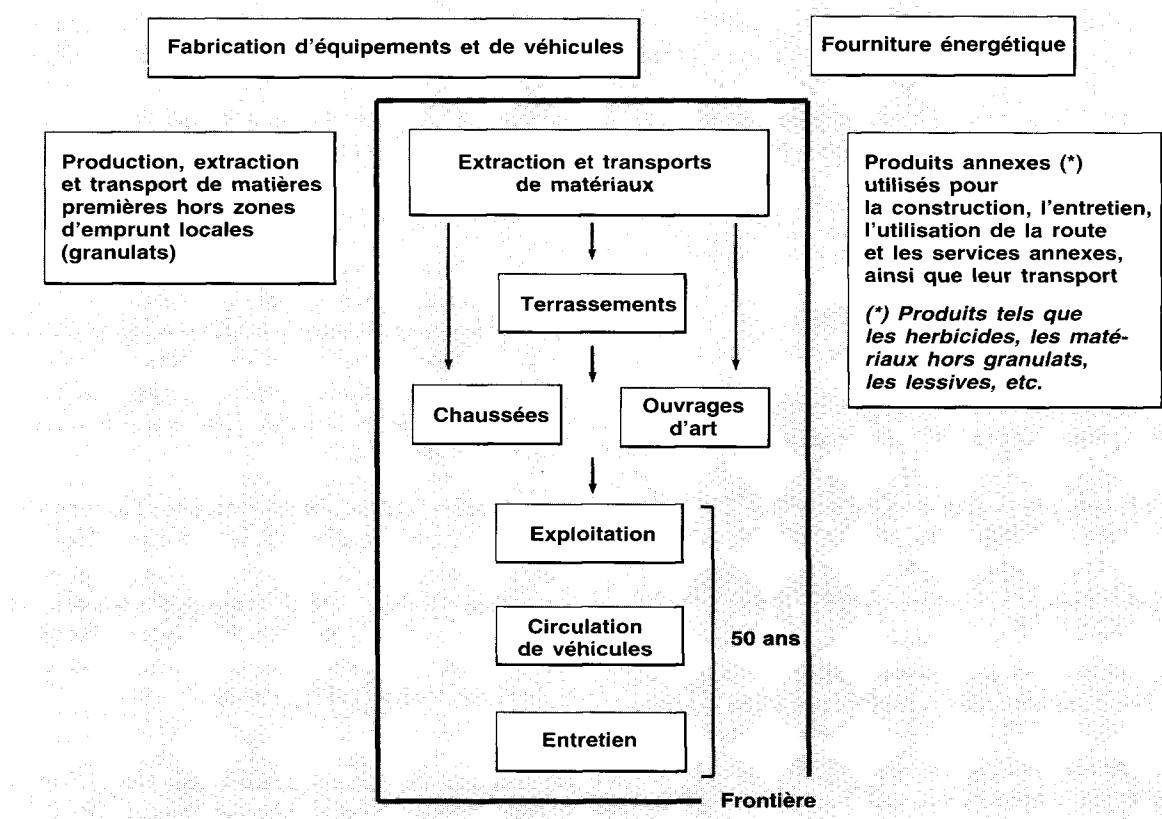


Fig. 1 - Frontière du système dont l'inventaire couvre la consommation énergétique globale.

TABLEAU I
Caractéristiques techniques des variantes

Caractéristiques	Variante		
	1	2	3
Longueur totale (km)	10,36	10,28	10,14
Viaduc (m) et soutènement (m)	-	440 et 560	-
Tunnel (m)	400 et 450	-	1 230
Déblais (m ³)	3 566 000	3 764 000	2 626 000
Remblais (m ³)	1 776 200	1 715 000	883 000

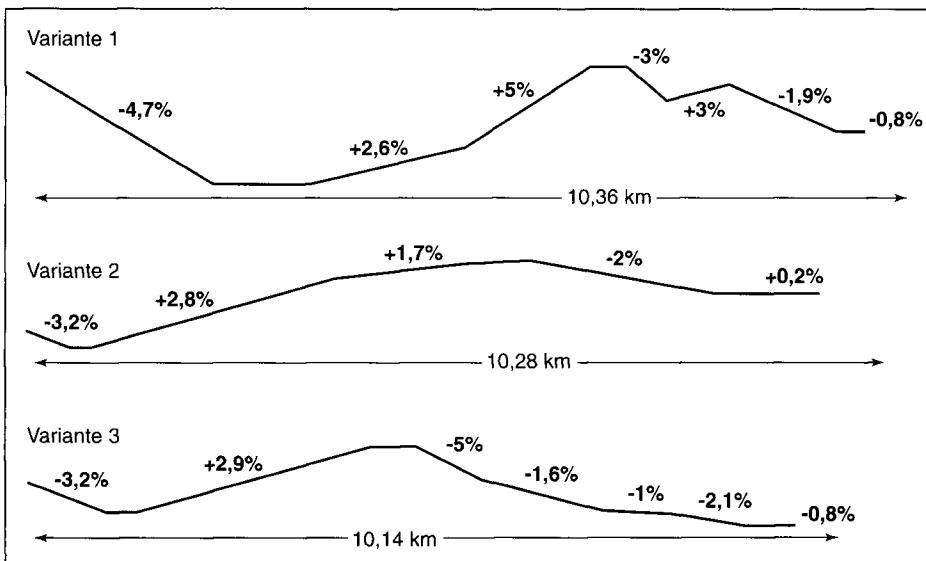


Fig. 2 - Pentes
du profil en long
des variantes dans
le sens nord-sud

Les variantes se situent dans une région montagneuse dont la topographie est susceptible d'influer fortement sur les résultats de la consommation de carburants (Joumard et al., 1990). Les pentes positives provoquent une augmentation de la consommation et les descentes la diminuent. La figure 2 présente le schéma du profil en long des trois variantes.

Consommation énergétique liée à la construction

La consommation énergétique unitaire liée à la construction (tableau II) a été définie dans les Méthodes d'évaluation des investissements routiers en rase campagne et en milieu urbain (Ministère de l'Urbanisme, du Logement et des Transports, 1986). Ces méthodes sont le résultat d'un colloque sur la route et l'énergie réalisé en 1981 (ATR, 1981).

L'estimation de la consommation énergétique pour les transports des remblais prend en compte la distance entre le centre géométrique de la longueur de remblais et celui de déblais de chaque variante, soit respectivement 5,1 km, 4,9 km, et 4 kilomètres.

Les zones de dépôts ne sont pas définies à ce niveau du projet et les distances ne sont probablement pas discriminantes en raison du rapproche-

ment entre les variantes. Cependant, la quantité transportée peut être différente compte tenu des différents volumes de déblais et de remblais. Ainsi, on adopte une distance de transport de matériaux égale à la moitié de la longueur moyenne des variantes, soit 5,13 km. Le poids de ce matériau peut être estimé en prenant une masse spécifique d'environ 1,8 t/m³ (ATR, 1981).

La quantité de béton pour le viaduc, pour le soutènement et pour les tunnels a été détaillée dans l'avant-projet sommaire ; la quantité d'acier n'a été développée que pour le viaduc. Ainsi, la quantité d'acier pour les autres ouvrages d'art est estimée d'après le ratio de 100 kg d'acier par mètre cube de béton.

Le volume d'extraction de matériaux durs des tunnels est évalué d'après leur volume (demi-cylindre) majoré de 20 %. La consommation énergétique de ce type d'extraction est majorée de 200 % compte tenu des difficultés associées aux travaux souterrains et à l'utilisation probable d'explosifs (ATR, 1981).

La consommation énergétique relative à la construction des chaussées est calculée selon la surface totale de chaussée de chacune des variantes, sans déduction des ouvrages d'art. Les glissières, par contre, ont été calculées seulement pour la plate-forme, après déduction des tunnels et du viaduc.

TABLEAU II
Consommation énergétique liée à la construction

Tâche ou matériau	Consommation unitaire (*) 10 ⁴ (tep)	Variante		
		1 (tep)	2 (tep)	3 (tep)
Déblais (matériaux meubles)	3/m ³	1070	-	418
Déblais (matériaux durs)	8/m ³	-	3 011	987
Remblais régalage	1,15/m ³	203	172	102
Remblais transports	0,5/t/km	812	756	314
Dépôts transports	0,5/t/km	910	1030	875
Mise en dépôt	1,3/m ³	256	290	246
Viaduc (béton)	400/m ³	-	439	-
Viaduc (acier)	6 000/t	-	1 015	-
Soutènement (béton)	400/m ³	-	1 579	-
Soutènement (acier)	6 000/t	-	2 400	-
Tunnel (matériaux durs)	(3x) 8/m ³	135	-	153
Tunnel (béton)	400/m ³	520	-	728
Tunnel (acier)	6 000/t	780	-	1 092
Chaussée	500/m ³	9 286	8 224	8 112
Glissière double	200/m	380	394	356
Total (tep)	-	14 350	19 310	13 380

(*) Source : Ministère des Transports, 1986. L'unité tep correspond à la tonne d'équivalent de pétrole.

Consommation énergétique liée à l'utilisation du tronçon autoroutier

Consommation énergétique relative à l'exploitation des variantes

La consommation d'énergie liée à l'exploitation des variantes (tableau III) correspond essentiellement à la présence de tunnels. L'aire de repos et l'échangeur sont présents dans les trois variantes et les données disponibles ne permettent pas d'estimer leur consommation énergétique.

La consommation d'énergie électrique des tunnels est fonction des équipements d'exploitation installés, du trafic, de la vitesse des véhicules, des conditions météorologiques, etc. Selon l'avant-projet sommaire et les calculs effectués au Centre d'études des tunnels (CETU), la consommation annuelle est de 3 292 000 kWh (variante 1) et de 2 451 000 kWh (variante 3). La conversion en tonne d'équivalent de pétrole (tep) s'effectue en prenant 1 tep égale à 4 500 kWh (ADEME, 1993), en tenant compte des pertes de rendement à la production et lors du transport de l'électricité.

Consommation énergétique liée à la circulation de véhicules

Certaines hypothèses sont nécessaires pour calculer la consommation de carburants au cours de cinquante ans. La vitesse moyenne des véhicules sera de 100 km/h (90 km/h pour les PL). Le pourcentage de VL diesel est aujourd'hui de 15 % ; il est prévu qu'il atteindra 36 % en 2010 (Joumard et Lambert, 1991). On suppose qu'au-delà l'importance relative des VL diesel se maintiendra à ce pourcentage limite. On fait également l'hypothèse que le parc VL est à l'horizon 2000 entièrement équipé de pots catalytiques.

Les calculs des émissions sont effectués dans les deux sens de circulation afin de prendre en compte les changements de pentes. Le trafic dans chaque sens est supposé être la moitié du trafic total.

Le trafic pris en compte est celui prévu dans les études d'avant-projet sommaire, soit 14 700 véhicules/j en l'an 2000 (trafic moyen journalier annuel) avec une croissance de 3,5 % jusqu'à 2010. Pour la suite, les hypothèses sont diverses car les prévisions de trafic à long terme sont soumises à de forts aléas. On propose d'avoir recours à un scénario où la croissance est faible mais toujours positive (tableau IV).

La composition du trafic présentée dans les études d'avant-projet sommaire prend en compte une proportion assez faible de poids lourds (7 %). Cette composition est admise comme constante jusqu'à 2050.

La consommation unitaire de carburants par type de véhicule est présentée dans le tableau V et les corrections de cette consommation en fonction de la pente dans le tableau VI.

TABLEAU III
Consommation énergétique annuelle liée à l'exploitation des tunnels

Exploitation des tunnels	Variante		
	1	2	3
Nombre de tunnels	2	-	1
Consommation d'énergie (kwh/an)	3 292 000	-	2 451 000
Consommation d'énergie (tep/an)	732	-	545

TABLEAU IV
Simulation de la croissance du trafic

Années	Croissance du trafic (%)
2000-2010	3,5
2010-2020	2,5
2020-2030	2
2030-2040	2
2040-2050	1,5

TABLEAU V
Consommation unitaire de carburants par type de véhicule pour les pentes inférieures à 2 %

Type de véhicule	Consommation unitaire de carburant (g/km)
(Joumard et al., 1990 et 1995) VL catalysé VL diesel	58,7 55,3
(Roumégoux, 1994) PL	257,8

TABLEAU VI
Facteurs de correction de la consommation de carburants en fonction de la pente

Pente (%)	Type de véhicule	Facteur de correction
5 à 4	VL catalysé (*) VL diesel (*) PL (**)	1,7 1,8 3,7
3 à 2	VL catalysé (*) VL diesel (*) PL (**)	1,3 1,4 2,1
- 2 à - 3	VL catalysé (*) VL diesel (*) PL (**)	0,7 0,7 0,2
- 4 à - 5	VL catalysé (*) VL diesel (*) PL (**)	0,5 0,4 0

(*) (Hassel et al., 1993).
(**) (Roumégoux, 1994).

Deux scénarios sont élaborés pour estimer la consommation de carburants au cours de cinquante ans. Le premier scénario prend en compte la variation du trafic et une consommation unitaire constante dans le temps. Le second scénario simule la même variation du trafic mais avec une décroissance de 50 % de la consommation unitaire à partir de 2025. Cette baisse de la consommation correspond à une situation liée aux exigences de la législation européenne préoccupée par les émissions des gaz à effet de serre (la Lettre de l'environnement, 1996). À partir de 2025, ces exigences ainsi que l'introduction des nouvelles technologies liées aux véhicules propres se feront sentir ; c'est pourquoi on suppose que 20 % du parc des VL sera composé de véhicules électriques à partir de 2025. Le tableau VII présente les résultats de la consommation de carburants au cours de cinquante ans.

L'introduction des voitures électriques diminue la consommation globale de carburants de 9 %. Cependant, il conviendrait de tenir compte de l'augmentation de la consommation d'énergie électrique que l'on a négligée en première approximation.

La différence de la consommation de carburants au cours de cinquante ans entre le scénario 2 et le scénario 1 est importante (35 %).

TABLEAU VII
Inventaire de la consommation de carburants
au cours de cinquante ans

Variante	Consommation (t)	
	Scénario 1	Scénario 2
1	536 800	342 220
2	528 670	337 320
3	518 560	330 780

Consommation énergétique liée à l'entretien

Selon les Méthodes d'évaluation des investissements routiers en rase campagne et en milieu urbain (Ministère de l'Urbanisme, du Logement et des Transports, 1986), la consommation énergétique d'entretien des chaussées est fonction de leur nature et de l'importance du trafic poids lourds. L'avant-projet sommaire indique une classe T1 (de 300 à 750 PL/j) pour la chaussée (identique pour toutes les variantes). La consommation énergétique correspondante est indiquée dans le tableau VIII.

L'entretien de chaussées, effectué tous les dix ans environ, correspond à la rénovation des couches de

surface de la chaussée. Cependant, l'entretien complet des variantes comprend d'autres tâches dont les données ne sont pas disponibles. On peut citer, par exemple, l'entretien des abords, des aires annexes, de l'échangeur, des ouvrages d'art, des ouvrages hydrauliques, de la signalisation, de la sécurité et des équipements divers. L'inventaire complet de la consommation énergétique pour l'entretien intégral des variantes pourrait alors être sensiblement modifié.

Les prévisions au cours de cinquante ans

Les consommations énergétiques se cumulant dans le temps sont celles associées à l'exploitation du tronçon autoroutier, à la circulation des véhicules et à l'entretien. La consommation d'énergie électrique des tunnels est supposée constante dans le temps ; on fait l'hypothèse que l'entretien des équipements peut assurer un fonctionnement sans perte d'efficacité. La consommation énergétique liée à l'entretien est également constante dans le temps. La consommation de carburants est fonction des variations du trafic et des conditions définies dans le scénario d'évolution des émissions unitaires.

Les consommations énergétiques relatives à la circulation de véhicules, à l'entretien et à l'exploitation des tunnels sont alors calculée au cours de cinquante ans. Les résultats sont présentés dans le tableau IX pour les scénarios 1 et 2, avec les résultats sur la consommation énergétique liée à la construction.

Comparaison des scénarios

Le seul changement simulé dans les scénarios est celui de la consommation de carburants. L'évolution technologique permettant un rendement plus important des moteurs à essence et l'introduction de véhicules propres ont apporté une baisse de la consommation énergétique totale d'environ 30 %. Cela signifie, en termes absolus, 190 000 tep. Ce chiffre n'a qu'une valeur hypothétique ; la consommation de carburants peut varier dans une marge assez large et toute prévision à long terme est difficilement validable. Cependant, le chiffre est important, il équivaut à la construction de 130 km d'autoroute. Les décideurs pourraient donc, par exemple, être amenés à s'interroger sur l'opportunité de concevoir des infrastructures aptes à minimiser la consommation de carburants, fût-ce au prix d'un investissement plus coûteux.

Cette baisse entre le scénario 1 et le scénario 2 est liée également aux efforts réalisés pour l'élaboration d'une normalisation européenne incitant à la baisse de la consommation.

TABLEAU VIII
Consommation énergétique annuelle
liée à l'entretien de chaussées

Type de chaussée	Consommation unitaire (tep/km/an)	Variante		
		1 (tep/an)	2 (tep/an)	3 (tep/an)
2 + 3 voies tout bitume (mixte, grave, laitier)	46	131	-	-
2 X 2 voies tout bitume (mixte, grave, laitier)	32	240	329	325
Total (tep/an)	-	371	329	325

TABLEAU IX
Inventaire de la consommation énergétique au cours de cinquante ans pour les scénarios 1 et 2

Étapes du cycle de vie	Variante		
	1 (tep)	2 (tep)	3 (tep)
Construction	14 350	19 310	13 380
Fonctionnement des tunnels	36 600	-	27 250
Entretien des chaussées	18 550	16 450	16 250
Circulation de véhicules : scénario 1	536 800	528 670	518 560
Circulation de véhicules : scénario 2	342 220	337 320	330 780
Total scénario 1	606 300	564 430	575 440
Total scénario 2	411 720	373 080	387 660

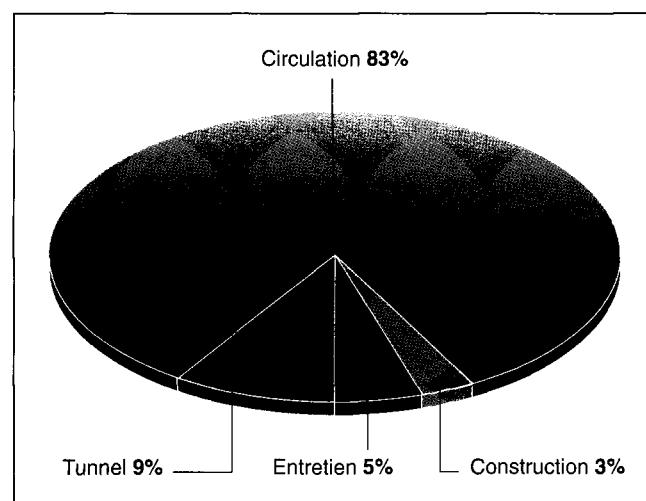


Fig. 3 - Répartition de la consommation énergétique totale pour la variante 1 (scénario 2).

Comparaison des modes de consommation énergétique

Il est intéressant de remarquer que le seul entretien des chaussées au cours de cinquante ans consomme plus d'énergie que la construction de la variante dans son ensemble (sauf variante 2). Le fonctionnement des tunnels représente également une forte consommation énergétique par rapport à la construction et à l'entretien de chaussées.

La consommation liée à la circulation de véhicules représente la majorité de la consommation totale d'énergie. Les trois autres types de consommation additionnés ne correspondent qu'à environ 17 % du total (fig. 3). La baisse de 30 % de la consommation de carburants et l'introduction de voitures électriques n'ont que faiblement diminué la contribution de cette consommation dans la consommation énergétique totale, qui est passé de 88 % dans le scénario 1 à 83 % dans le scénario 2 (variante 1).

Un facteur qui joue beaucoup dans la consommation énergétique relative à la circulation de véhicules est la topographie du terrain. Les facteurs de correction, fonction de la pente, donnent une idée de la majoration apportée à la consommation. Un changement au niveau de la topographie peut apporter des renseignements sur la consommation d'un tracé en région montagneuse par rapport à un tracé en région plate.

Si l'on compare la consommation au cours de cinquante ans de la variante 1 avec celle d'une variante de même longueur mais dont les pentes ne dépasseraient pas 2 % (aucun facteur de correction n'est appliqué dans ce cas), la consommation liée à la circulation de véhicules diminuerait de 25 %. Pour le scénario 2, cette économie d'environ 84 000 tep équivaudrait à la construction de six sections égales à la variante 3 (environ 60 km d'autoroute).

Les plus fortes économies peuvent se faire évidemment sur les carburants. Le fonctionnement des tunnels peut éventuellement améliorer la performance, ainsi que l'entretien des chaussées, avec des nouvelles technologies pour augmenter leur durabilité, mais les économies significatives ne peuvent être obtenues qu'à l'aide de réductions sur la consommation de carburants.

La consommation énergétique liée à la construction intervient peu dans le bilan au cours de cinquante ans. Cependant, les valeurs actuelles de cette consommation peuvent avoir un poids important pour le choix de la variante.

Le tableau X montre la répartition de la consommation énergétique relative à la construction pour chaque tâche. La part importante de la consommation énergétique pour les ouvrages d'art de la

variante 2 est provoquée par la construction du mur de soutènement. Ce mur en béton armé utilise une quantité importante d'acier, représentant ainsi une consommation énergétique forte.

La construction des chaussées tient la part la plus importante dans la consommation énergétique liée à la construction ; néanmoins, son calcul a inclus l'équivalent énergétique du bitume (ATR, 1981). Cela peut être mis en question si l'on considère le bitume comme un déchet.

TABLEAU X
Répartition de la consommation énergétique liée à la construction par tâche

Tâche	Variante					
	1 (tep)	(%)	2 (tep)	(%)	3 (tep)	(%)
Terrassements	3 251	23	5 259	27	2 942	22
Ouvrages d'art	1 435	10	5 433	28	1 973	15
Chaussées et glissières	9 666	67	8 618	45	8 468	63
Total	14 352	100	19 310	100	13 383	100

TABLEAU XI
Rapport entre les consommations énergétiques des variantes

Étapes du cycle de vie	V2/V1 (%)	V3/V1 (%)	V3/V2 (%)
Construction (tep)	+ 26	- 7	- 30
Fonctionnement des tunnels (tep)	- 100	- 26	+ 100
Entretien des chaussées (tep)	- 11	- 12	- 1
Circulation de véhicules (tep)	- 1	- 3	- 2
Total (tep)	- 9	- 6	+ 4

Comparaison des variantes

Le tableau XI présente les rapports entre les consommations énergétiques des variantes. La consommation de carburants montre des rapports faibles. Néanmoins, les différences absolues entre les variantes peuvent être importantes ; la seule différence de consommation de carburants entre la variante 1 et la variante 3 (11 400 tep) correspond à 85 % de celle liée à la construction de la variante 3.

On ne tirera pas ici de conclusions sur ce qui serait la « meilleure » variante. Le seul critère de la consommation énergétique ne peut pas orienter la décision sur un projet pouvant concerter différents autres aspects de l'environnement. Mais cette étude, où l'analyse du cycle de vie est illustrée par l'application de ses principes à la consommation énergétique, permet néanmoins de montrer de quelle manière cet outil peut aider à la prise de décision.

Conclusions

L'application de l'analyse du cycle de vie est aujourd'hui en plein développement. Cette étude est une contribution à cette application au secteur des transports routiers. Trois variantes d'un même tronçon autoroutier ont été comparées à l'aide d'un facteur d'impact significatif : la consommation énergétique. Cette consommation recouvre les consommations partielles relatives à la construction, l'entretien, le fonctionnement des tunnels et la circulation de véhicules.

Les résultats montrent que la variante 2 (sans tunnel) présente la plus faible valeur de consommation énergétique. La différence majeure est l'exploitation des tunnels, absents dans cette variante. Si l'on compare la consommation énergétique des deux variantes avec tunnels, la différence se monte à 24 000 tep, représentant environ 85 % de la consommation énergétique pour la construction de ces deux variantes.

La consommation de carburants représente la fraction la plus importante de la consommation énergétique totale (83 %). À l'égard de cette consommation, la variante 3 devient la plus intéressante. La topographie joue un rôle important dans la consommation de carburants. La différence entre une variante plate et la variante 1 est d'environ 84 000 tep, soit l'équivalent pour la construction d'une section de 60 km d'autoroute (variante 1).

Il est intéressant de constater la faible contribution de la consommation liée à la construction (3 %) pour le bilan énergétique au cours de cinquante ans. Les plus fortes économies d'énergie peuvent être obtenues par la diminution de la consommation de carburants, et cela en rapport direct avec la conception de l'infrastructure.

Les diverses possibilités d'exploitation des résultats permettent d'élargir l'objectif initial de cette étude. L'aide à la décision dépasse ainsi le seul cadre de comparaison de variantes. En outre, les valeurs chiffrées sur lesquelles sont appuyées les décisions leur confèrent un caractère plus objectif.

L'intérêt de l'analyse du cycle de vie est, outre la quantification des données, l'introduction de l'échelle de temps (durée de vie de l'infrastructure). Le bilan énergétique ne se limite plus à la construction et la mise en service de l'autoroute, il s'agit d'une évaluation à long terme.

La démarche de l'analyse du cycle de vie appliquée aux infrastructures autoroutières doit intégrer l'ensemble des facteurs d'impact tels que les émissions atmosphériques, les rejets de polluants dans l'eau, la consommation d'espace, le bruit, etc., pouvant ainsi couvrir différents aspects de l'environnement. Un domaine à développer, et qui concerne particulièrement les

infrastructures autoroutières, est l'évaluation des impacts locaux ; ces impacts appartiennent à une catégorie définie par la SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) (Udo de Haes, 1996). L'évaluation de ce type d'impact, rarement traité dans les analyses du cycle de vie, a été par ailleurs signalé dans les conclusions du programme RÉGENER (*) (1996) comme une recherche à développer.

D'autres questions restent également ouvertes à la recherche :

➤ de nombreuses données manquent pour certains facteurs d'impact. Par exemple, même pour la consommation énergétique, où des données existent, on manque d'informations sur la consommation énergétique liée à l'entretien. Un effort sup-

plémentaire doit être réalisé par le recueil de données afin de permettre une application convenable de l'analyse du cycle de vie ;

➤ la recherche de données actuelles et de leur fiabilité est également à développer dans toute application d'une analyse du cycle de vie. Dans le cas de la consommation énergétique, les données de consommation liée à la construction datent de 1981, et bien que fiables, sont relativement anciennes. Il peut être intéressant de prévoir une actualisation de ces informations.

L'application de l'analyse du cycle de vie à la comparaison de variantes autoroutières ouvre le champ à son application à d'autres infrastructures de transports et même à la comparaison de modes de transports. Cet outil doit cependant être manipulé avec précaution et répondre aux conditions de transparence exigées par la norme NF X 30-300. C'est seulement ainsi que l'analyse du cycle de vie pourra être un outil approprié pour l'intégration du « développement durable » dans la stratégie environnementale du gouvernement et des entreprises.

(*) Programme européen DGXII : Méthodologie européenne pour l'évaluation des impacts environnementaux de bâtiments. Analyse du cycle de vie.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME (1993), *Faits et figures. Énergie et environnement*, Données et références.
- AFNOR (1996), *Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre*, Normalisation française EN ISO 14040 (norme NF X 30-300).
- ATR (1981), *Colloque sur la route et l'énergie : construction et entretien*, Groupes de travail des journées d'études.
- HASSEL D., JOST P., WEBER F.J., DURSBECK F., SONNBORN K.S., PLETTEAU D. (1993), *Exhaust emission factors for motor vehicle in the Federal Republic of Germany for the reference year 1990*, Federal Ministry for the Environmental, Rhineland Technical Inspection Authority for Safety and Environmental Protection (TÜV).
- JOUMARD R., VIDON R., PATUREL L., PRUVOST C., TASSEL P., DE SOETE G., SABER A. (1995), *Évolution des émissions de polluants des voitures particulières lors du départ moteur froid*, Rapport INRETS, 197, ADEME.
- JOUMARD R., LAMBERT J. (1991), *Évolution des émissions de polluants par les transports en France de 1970 à 2010*, Rapport INRETS, 143, Ministère de l'Environnement, CETU, AQA.
- JOUMARD R., PATUREL L., VIDON R., GUITTON J.-P., SABER A., COMBET E. (1990), *Émissions unitaires de polluants des véhicules légers*, Rapport INRETS, 116, AQA, CETU, CETUR.
- La Lettre de l'environnement (1996), *Les objectifs du programme européen de réduction des polluants d'origine automobile*, Victoires Editions, 206, p. 5.
- MATET (1995), *Instruction cadre relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructure de transport*, Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Équipement et des Transports, Jointe à la circulaire du 3 octobre 1995 du Secrétaire d'État aux Transports.
- Ministère des Transports (1986), *Méthodes d'évaluation des investissements routiers en rase campagne et en milieu urbain*, Lettre-circulaire du 14 mars 1986, fascicule spécial 86-11 bis, Direction des routes.
- PEREIRA A., BLANC I., COSTE J.-F. (1996), *Évaluation globale des impacts des infrastructures autoroutières : contribution à l'analyse du cycle de vie*, Rapport LCPC, INERIS, Vol. I et II.
- REGENER (Programme) (1996), *European methodology for the evaluation of environmental impact of buildings. Life cycle assessment*, Rapport RÉGENER, EC, Directorate general XII for science, research and development, programme APAS.
- ROUMÉGOUX J.-P. (1994), *Émissions de polluants par les véhicules industriels. Modèle SIVA*, INRETS, ADEME, 2.03.0034.
- UDO DE HAES H.A. (1996), *Discussion of general principles and guidelines for practical use*, In *Towards a methodology for life cycle impact assessment*, SETAC-Europe, WIA (Workgroup on Life Cycle Impact Assessment).

Remerciements. Les auteurs remercient la DRAST et l'ASFA pour leur aide financière et les membres du Comité de pilotage : MM. Sanejouand (LCPC), Soleau (ASFA), Merle (SCETAUROUTE), Deutsch (CERGRENE), Landrieu (INERIS) pour leur aide technique.

ABSTRACT

The overall energy consumption of motorways. A contribution to life cycle analysis

A. PEREIRA, I. BLANC, J.-F. COSTE

This study is part of a comprehensive analysis of the environmental impacts of motorways. Its purpose is to go beyond the customary frame of impact appraisal which considers construction and commissioning of a new motorway and to achieve this it is based on life cycle analysis. This study deals with the comparison of variants for motorways (outline draft project).

Life cycle analysis (specified in French standard NF X30-300) is based on a method for evaluating impacts throughout the life cycle of a structure - construction, use and maintenance. The duration of operation has been taken as being 50 years.

Particular attention is paid to overall energy consumption. This consumption has been estimated for earthworks, engineering structures, pavements and pavement maintenance, tunnel operation and vehicle traffic over fifty years. A number of different traffic growth scenarios have been considered.