

ESSAI D'ESTIMATION D'UNE VITESSE OPTIMALE POUR LES VÉHICULES LÉGERS SUR LE RÉSEAU INTERURBAIN FRANÇAIS¹

LAURENT CARNIS
GARIG
INRETS

1. ÉTAT DES LIEUX ET IMPLICATIONS DE LA DÉMARCHE

L'étude de la vitesse et des limitations de vitesse est un phénomène relativement bien circonscrit dans la littérature (CARNIS, 2001b : Chap. 1 ; COHEN et alii, 1998). Les effets en termes d'accidentologie, les enjeux pour les différents acteurs, les contraintes mécaniques, ainsi que l'influence des représentations sur les conduites constituent un corpus de connaissances élaboré. Ces recherches sont le résultat d'approches d'ingénierie et en sociologie, d'analyses psychosociologiques et mécaniques. Les apports de l'économie dans ce domaine apparaissent restreints. Ceci tient moins au fait d'un potentiel de connaissances limité propre à cette démarche que par une absence de travaux sur le sujet. Il semblerait que la priorité des premières

¹ Les trajets sur autoroute sont exclus de l'analyse.

recherches ait été la démonstration des effets bénéfiques d'une limite de vitesse en termes de réduction de l'insécurité routière.

Ainsi les premiers travaux réalisés par l'Organisme National de Sécurité Routière (ONSER) consacrent une part limitée à la dimension économique du phénomène. Elle est évoquée seulement lors de l'évocation du coût supplémentaire imposé aux conducteurs par l'introduction d'une limite de vitesse (ONSER, 1969 : 14). La dimension économique est introduite lors de la discussion des coûts d'adaptation des infrastructures routières et des implications pour les constructeurs automobiles de modifier leur système productif. Il en est également question lors de l'évaluation du coût de la mise en œuvre d'une politique de communication et de répression accompagnant la nouvelle mesure (ONSER, 1969 : 12 et 13).

En 1969, une étude pilote rédigée pour le ministère de l'équipement et du logement avait ébauché un travail de valorisation des coûts et des avantages liés à l'adoption d'une limite de vitesse. Même si certains chiffres doivent être appréciés avec prudence, le travail restait remarquable sur un certain nombre de points avec des estimations relativement précises. Malheureusement, le travail n'avait pu conclure, faute d'un chiffrage des dommages matériels et humains (GROUPE D'ÉTUDE PRDA, 1969). Cette absence est également notable au sein du document publié par le ministère des communications en 1971 sur la *limitation généralisée des vitesses en dehors des agglomérations* (MINISTÈRE DES COMMUNICATIONS, 1971). Il est avancé qu'une vitesse plus faible diminue les coûts de transport et notamment ceux en carburant (MINISTÈRE DES COMMUNICATIONS, 1971 : 55). Les conséquences économiques associées à une limite de vitesse ne sont pas poursuivies plus en avant.

Des recherches empiriques menées à l'étranger indiquent une prise en compte plus marquée de la dimension économique. Les travaux de la Table Ronde de la CEMT sur les coûts et avantages des limitations générales de vitesse (1977) témoignent à la fois des nécessités d'intégrer la dimension économique et des difficultés de mener de tels travaux compte tenu des exigences en matière d'information. D'autres travaux plus récents se sont également intéressés à évaluer la dimension monétaire associée au choix d'une limite de vitesse (CAMERON, 2002 ; MONASH UNIVERSITY ACCIDENT RESEARCH CENTRE, 2001 ; KALLBERG et alii, 1998 ; RIETVELD et alii, 1996). Toutefois, ces travaux essaient d'apprécier si l'évolution de la limite de vitesse représente un gain ou un coût net pour la société et non de déterminer une vitesse optimale. Seuls quelques travaux traitent de cette dimension (ELVIK, 2002 ; JONDROW et alii, 1985 ; SALUJÄRVI, 1981 ; CARLSSON, 1997 ; CROUCH, 1976 ; GHOSH et alii, 1975).

Utiliser une procédure de détermination de la vitesse optimale pour un réseau spécifique et pour une catégorie d'utilisateurs comporte des implications précises. Pourquoi se limiter à telle catégorie d'utilisateurs et ne pas intégrer

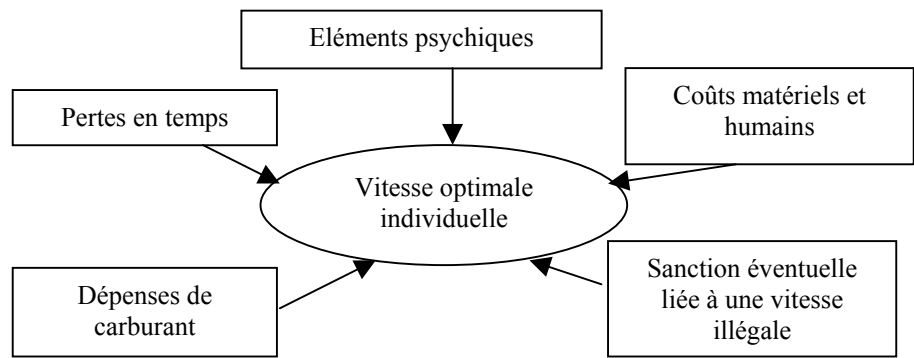
dans la démarche telle autre ? La vitesse optimale peut-elle être calculée indépendamment des effets induits sur d'autres axes ? Le choix de ces critères repose donc sur une décision a priori de la part du chercheur ou du politique lorsqu'il commande une évaluation. De manière similaire, les composantes intégrées et la manière avec laquelle elles sont valorisées reposent sur des choix qui peuvent être contestés. Les variables utilisées peuvent être considérées trop imprécises et non représentatives de la réalité sociale. Enfin, l'agrégation des coûts et des avantages monétaires a-t-elle réellement un sens et est-ce une opération licite ? En somme, ce modèle repose sur des hypothèses qui peuvent et doivent être soumises à la critique. Il reste, nous semble-t-il, qu'il s'agit d'un passage obligé pour produire un certain nombre de connaissances. Il doit être compris comme un moyen d'apprécier une réalité et de parvenir à des ordres de grandeur. Le choix de ces hypothèses repose donc sur des valeurs propres au décideur central ou au planificateur. La définition du concept de vitesse optimale (2), son élaboration théorique (3) et les estimations empiriques (4) reposent sur ces hypothèses. L'appréciation et l'introduction du cadre institutionnel permettent d'en saisir toutefois l'importance (5).

2. LE CONCEPT DE VITESSE OPTIMALE

L'analyse économique classique présente l'individu comme recherchant la maximisation de sa satisfaction. Chaque action menée résulte d'un arbitrage entre des gains et des coûts. L'action entreprise permet ainsi d'atteindre le niveau de satisfaction le plus élevé et répond au plan se situant au niveau le plus haut sur son échelle de préférence. La conduite automobile ne présente pas à cet égard de particularités empêchant l'application de ce modèle (MCKENZIE et alii, 1975).

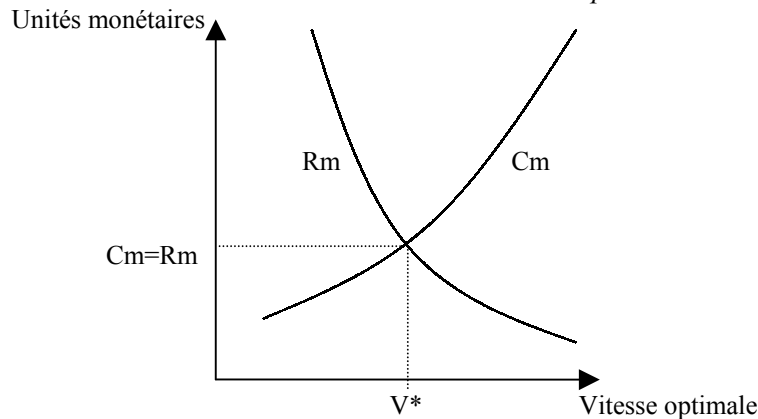
Le conducteur détermine sa *vitesse de circulation optimale* en tenant compte des gains escomptés et des coûts liés aux différents types de conduite (CARNIS, 1999a). Il intègre également la possibilité d'un comportement alternatif. En cela, il détermine son niveau de vitesse idoine par rapport à une multiplicité de niveaux de vitesse. Les gains pris en compte peuvent être de nature monétaire comme les gains en temps de trajet, la possibilité de réaliser des activités productives plus nombreuses, mais également de nature psychique comme le plaisir retiré, la sensation de puissance ou encore la valorisation de son image. Les coûts peuvent être classés selon des catégories similaires : dépense de consommation de carburant, dégâts matériels liés aux accidents, paiement éventuel d'une amende pour excès de vitesse pour la dimension monétaire, et des coûts de nature psychique comme la souffrance liée à des blessures, la peur lors de situations extrêmes, etc. (Schéma 1).

Schéma 1 : Facteurs déterminant la vitesse optimale individuelle



Dans ce cadre d'analyse, la vitesse optimale individuelle (V^*) est définie par l'égalisation du revenu marginal au coût marginal (Schéma 2). Toute vitesse de circulation supérieure à ce niveau optimal se traduit nécessairement par une augmentation de coûts plus importante que celle des gains. Il s'ensuit une perte nette. Toute vitesse en-deçà implique un manque à gagner et donc une perte de revenu (VARIAN, 2000 (1987) ; CARNIS, 1999a).

Schéma 2 : Détermination de la vitesse optimale individuelle



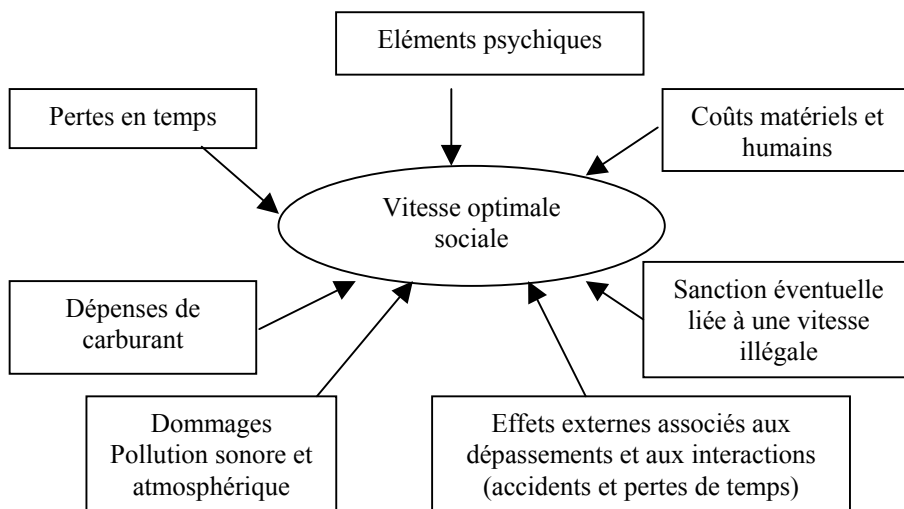
La conduite automobile implique l'usage d'une ressource, la voirie. La vitesse de circulation n'en est que l'une des modalités. La conduite peut donc être assimilée à une demande dérivée d'infrastructure routière. En effet, une vitesse de circulation plus élevée implique une demande d'espace exigée dans un délai plus court (pour une même distance de parcours), ou autrement dit, une demande d'espace plus importante pour une même durée de parcours. La détermination d'une vitesse optimale individuelle peut être interprétée comme la consommation d'un bien disponible². Elle pourrait à ce titre être

² En effet, il est nécessaire de distinguer la vitesse à laquelle désirent circuler les conducteurs et la vitesse à laquelle ils circulent effectivement. Cette distinction se réfère à la différence entre la quantité d'un bien pour laquelle un consommateur révèle ses préférences et ce dont il dispose réellement lors de l'allocation compte tenu du comportement des autres acheteurs.

facilement identifiée au concept de vitesse « libre »³, définie par le 85^{ème} centile de la distribution des vitesses. Cette vitesse est définie comme libre dans la mesure où elle rend compte d'une vitesse de circulation sans interaction entre les conducteurs.

Cependant, l'activité de conduite s'exerce dans le cadre d'un espace partagé. Il s'agit d'une consommation collective d'espace impliquant (la plupart du temps) des interactions entre les divers usagers. Ces interactions traduisent le désir de consommation d'un bien à un même moment⁴ et selon des modalités différentes. Certains conducteurs désirent circuler à des vitesses plus ou moins élevées. Au-delà des contraintes inhérentes à toute activité humaine de consommation (ressource limitée, demande des autres consommateurs...), une consommation collective implique une contrainte supplémentaire : la nécessité de tenir compte de la consommation (et pas seulement de la demande) des autres usagers. Au niveau sociétal, une vitesse optimale peut donc être déterminée pour le réseau interurbain. L'existence d'interactions implique une distinction entre les vitesses optimales individuelle (V_i^*) et sociale (V_s^*). Et cela pour au moins deux raisons (Schéma 3).

Schéma 3 : Facteurs déterminant la vitesse optimale sociale



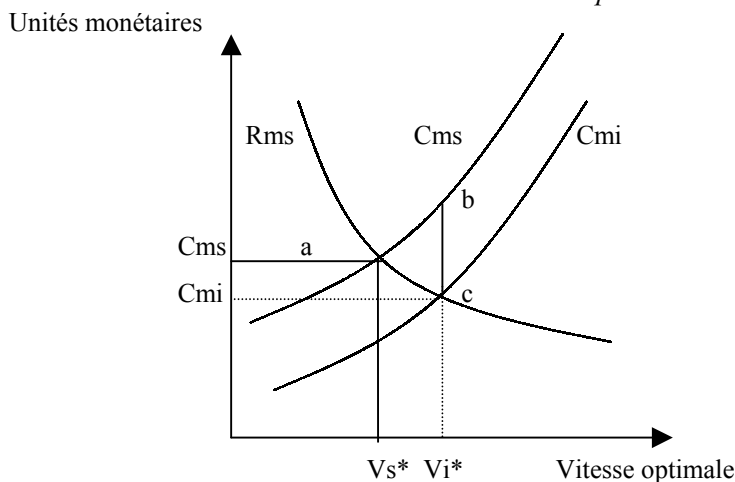
La première est relative aux conditions d'usage de la voirie. En effet, pour une offre de voirie fixe à court terme et des demandes individuelles

³ La notion de vitesse libre fait référence à la vitesse de circulation d'un véhicule qui ne subit aucune influence de la part d'autres véhicules du fait du trafic. « *A free-flowing vehicle is one whose driver has the ability to choose a speed of travel without undue influence from other traffic, conspicuous police presence, or environmental factors. In other words, the drivers of free-flowing vehicle chooses a speed that he or she finds comfortable on the basis of the appearance of the road* » (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 1998 : 401). Pour une utilisation du terme de vitesse « libre », Cf. CAMERON et alii (2003 : 29).

⁴ La congestion en est l'expression la plus extrême.

différenciées, les interactions sont inévitables. Ainsi les plans individuels s'influencent mutuellement. Des dépassements sont inévitables et impliquent la prise de risques supplémentaires (HAUER, 1971). Par ailleurs, d'autres véhicules ralentissent du fait de l'impossibilité de dépasser. La seconde raison résulte en partie des conséquences des interactions. Il s'agit de l'existence d'effets externes. Certains conducteurs doivent supporter une partie des coûts engendrés par l'action d'autres conducteurs, lors d'accidents par exemple (congestion sur la voie du fait de la fermeture partielle de l'axe...) ou lorsqu'un conducteur impose à un autre de décélérer ou de modifier sa trajectoire. De même, l'usage de l'automobile est source de pollutions sonore et atmosphérique plus ou moins prononcées. Ces pollutions ne sont pas toujours prises en compte par le conducteur lors du choix d'une modalité de conduite (RIETVELD et alii, 1996). Certains usagers supportent des coûts alors qu'aucune transaction n'y est associée. Il s'ensuit donc que le coût marginal social (Cms) est plus important que le coût marginal individuel (Cmi)⁵. L'implication traditionnellement avancée par la théorie économique est la détermination d'une vitesse optimale sociale plus faible que celle individuelle (Schéma 4). Autrement dit, le conducteur, qui ne supporte pas la totalité des coûts de son action, circulera à une vitesse trop élevée d'un point de vue social⁶.

Schéma 4 : Détermination de la vitesse optimale sociale



L'existence d'effets externes conduit à une situation économique sous-optimale. Cela se traduit par l'existence d'une perte, qui peut être représentée par la surface définie par les points (abc). Celle-ci est supportée par certains

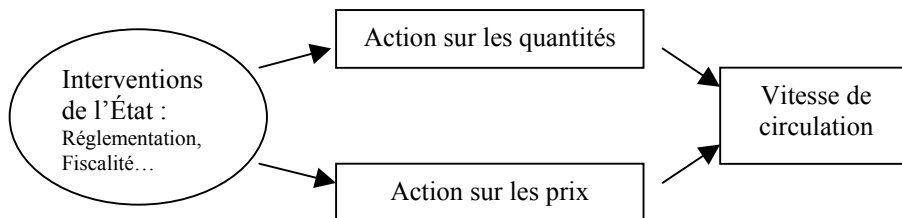
⁵ En l'absence de mécanismes d'internalisation.

⁶ En fait, il existe également des interactions entre les effets externes. Ainsi un conducteur peut obliger un autre à ralentir. Cependant le ralentissement imposé permettra, par exemple, de réduire la pollution atmosphérique. En cela, un effet externe peut diminuer l'impact d'un autre effet externe mais de nature différente.

agents. Il s'agit de victimes de la route comme les piétons, les cyclistes ou d'autres usagers motorisés, mais également des habitants supportant les différentes formes de pollution.

Face à cette situation, l'intervention des autorités est généralement admise afin d'internaliser ces effets. Cette intervention peut prendre la forme d'une action par l'intermédiaire des prix ou des quantités (Schéma 5). L'intervention par les prix est relativement difficile dans la mesure où l'usage de la voirie n'est pas tarifé. Elle prend alors des formes indirectes par l'intermédiaire d'une taxe sur les carburants, des contributions fiscales et parafiscales sur les primes d'assurance versées. L'intervention par les quantités peut conduire à modifier physiquement l'infrastructure ou à imposer l'installation de limiteurs de vitesse. La réglementation⁷ avec l'imposition de limites de vitesse et le déploiement de moyens idoines pour son application est un autre vecteur d'intervention. En effet, l'objectif d'une limite de vitesse peut viser à réduire les vitesses de circulation, afin de limiter le nombre de victimes. Mais ceci ne constitue pas le seul objectif⁸. La difficulté pour les autorités réside toutefois dans la détermination d'une réglementation optimale et de son application effective (CARNIS, 2001b : 153).

Schéma 5 : Interventions de l'Etat permettant d'influencer la vitesse de circulation



3. LE MODÈLE THÉORIQUE DE DÉTERMINATION D'UNE VITESSE OPTIMALE SOCIALE

Le modèle raisonne à trafic constant⁹. En conséquence, toute augmentation de la vitesse de circulation ou sa baisse n'entraîne pas de comportement de substitution (à court terme)¹⁰. De même, le cadre environnemental (règle de

⁷ La réglementation constitue un moyen indirect d'influencer les prix et les quantités disponibles sur un marché.

⁸ En effet, la baisse de la limitation de vitesse peut être utilisée à des fins de réduction de la pollution.

⁹ En conséquence, un temps de parcours plus long ou plus court est supposé ne pas influencer le kilométrage parcouru.

¹⁰ Les effets de substitution entre les différents modes de transport (route, rail...), entre les moyens de transport (automobile, motocyclette, bus...) et les réseaux (autoroute, route nationale et départementale...) ne sont pas considérés.

responsabilité, politique de contrôle des vitesses, modification des comportements en matière d'habitation, acceptabilité sociale des différents usagers, règles de compensation...) est considérée stable (RIETVELD et alii, 1996). Une situation d'équilibre local est supposée. A partir de ce cadre d'analyse, une vitesse socialement optimale peut être déterminée.

3.1. LES GAINS EN TEMPS

La détermination d'une vitesse socialement optimale implique de préciser les relations entre la vitesse de circulation et les gains d'une part, entre vitesse et les coûts d'autre part. Les gains procurés par une vitesse de circulation plus élevée sont associés aux économies de temps. Si le kilométrage (X) est effectué par une population sur une période donnée à une vitesse moyenne de (V), alors le temps de circulation associé est de T :

$$X=V \times T \text{ alors } T=\frac{X}{V} \quad (1)$$

En conséquence, si la vitesse moyenne de circulation augmente, le temps nécessaire pour parcourir la même distance diminue :

$$\frac{\partial T}{\partial V} = -\frac{X}{V^2} \quad (2)$$

Le coût en temps (G) est alors défini par le produit de la valeur unitaire du temps (p) et le temps de parcours (3). L'économie de temps associée à une vitesse circulation plus élevée est donnée par (4).

$$G=p \times T \quad (3)$$

$$\frac{\partial G}{\partial V} = -\frac{X}{V^2} \times p < 0 \quad (4)$$

Lorsque la valeur du temps d'un individu augmente, sa propension à conduire à une vitesse plus élevée, *ceteris paribus*, doit nécessairement s'accroître. En effet, si le temps consacré à l'obtention d'un même service augmente, le coût d'opportunité de cette action s'avère être plus onéreux. Cela implique de renoncer à d'autres sources de satisfaction, le temps disponible étant fixe (une journée de 24 heures). En conséquence, accroître sa vitesse de circulation constitue un moyen de desserrer cette contrainte.

Ainsi le conducteur circule à une vitesse rapide dans la mesure où la valeur de son temps est élevée. En aucun cas, la relation en sens inverse ne peut être établie. En effet, une vitesse de circulation élevée peut aussi trouver des justifications dans le plaisir de la vitesse ou être recherchée pour véhiculer une image auprès des autres usagers. Bien que la valeur du temps puisse être rattachée à la vitesse de circulation, elle ne constitue pas une variable de commande pour les autorités. Elles ne peuvent déterminer la valeur du temps. Certes les autorités peuvent prendre des mesures consistant à réduire le niveau de la vitesse de circulation. Cependant, ces mesures n'impliquent pas une valeur du temps du conducteur plus faible. En fait, l'intervention des autorités conduit à une distorsion dans l'allocation temporelle des ressources

par l'individu.

La valeur du temps peut varier également selon le moment de la journée, la période de l'année, et selon l'intensité de l'activité du conducteur¹¹. La composante psychique ne doit pas être oubliée. Ainsi, la valeur du temps d'un individu peut être de 20 euros, ce qui le conduira à circuler à x km/h à un moment donné. Au cours d'un moment relativement intense de son activité professionnelle (forte concurrence entre deux actions alternatives pour une même période de temps par exemple), le conducteur accroît sa vitesse de circulation, car la valeur de son temps s'en trouve accrue. La vitesse de circulation choisie par un conducteur intègre également une dimension psychique (exemple du temps supplémentaire passé pour réaliser un parcours qui est compensé par un revenu psychique associé à l'admiration du paysage, le plaisir de prendre son temps ; satisfaction retirée par une conduite rapide...). Ce modèle constitue ainsi une approximation de la valeur du temps des conducteurs par l'estimation d'une valeur moyenne monétaire. Il ne prend pas en compte les possibilités de forte augmentation de celle-ci lors de circonstances particulières (Cf. BUTTON, 1993).

3.2. LES COÛTS DE LA CIRCULATION AUTOMOBILE

Les coûts associés à la circulation automobile comprennent entre autres les dépenses de carburant (C_v). Celles-ci sont définies par le produit du prix du carburant (p_e) et de la consommation de carburant ($C_e(V)$) qui dépend de la vitesse de circulation (V). La dérivée première de (C_v) par rapport à (V) détermine le coût marginal des dépenses de carburant lié à l'accroissement de la vitesse de circulation (6). Une vitesse de circulation plus élevée conduit ainsi à une consommation de carburant plus importante et les dépenses s'en trouvent accrues.

$$C_v = p_e \times C_e \quad \text{avec} \quad C_e = C_e(V) \quad \text{et} \quad \frac{\partial C_e}{\partial V} > 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_v}{\partial V} = p_e \times \frac{\partial C_e}{\partial V} > 0 \quad (6)$$

3.3. LES DOMMAGES CAUSÉS PAR LES ACCIDENTS DE LA CIRCULATION

L'accident de la circulation engendre des pertes temporaires (cas d'une blessure), des pertes définitives (décès, section d'un membre...) et des dommages réparables ou remplaçables (dommage matériel). NILSSON met en relation les variations du taux d'accidents et de la vitesse : selon la catégorie de dommage, l'évolution varie selon un exposant (n). Ainsi, il utilise les exposants 2, 3 et 4 respectivement pour les accidents matériels, les blessés et les tués (NILSSON, 1981 : 8). EVANS utilise une variante en proposant les valeurs 1, 2

¹¹ Il existe alors une concurrence accrue dans les usages alternatifs possibles de la ressource temporelle.

et 4. CAMERON (2002 : 5 et 6) utilise une variante de cette d'expression. Nous utiliserons donc la formule suivante, avec les exposants tels que NILSSON les a définis. Ainsi :

$$\frac{R_1}{R_0} = \left(\frac{V_1}{V_0} \right)^n \quad (7)^{12}$$

En dérivant l'équation (7) par rapport à (V), il devient possible de déterminer l'évolution marginale du risque associée à un niveau de vitesse plus élevé (8).

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_1}{\partial V_1} &= R_0 \times n \times \left[\frac{V_1}{V_0} \right]^{n-1} \times \frac{1}{V_0} \\ \frac{\partial R_1}{\partial V_1} &= n \times \frac{R_1}{V_1} > 0 \end{aligned} \quad (8)$$

La somme des dommages physiques pondérés par la valeur monétaire moyenne attribuée à un blessé¹³ (Db), à un décès (Dc) et au préjudice matériel (Dm) permet de déterminer le coût total des dommages matériels et humains (Cd) associés à un niveau initial de vitesse (9). La variation marginale des dommages matériels et humains associée à un niveau de vitesse plus élevé est obtenue par la dérivée première de l'équation (9) par rapport à la variable de vitesse (V) (10).

$$Cd = Dm \times Rm_0 \times \left[\frac{V_1}{V_0} \right]^2 + Db \times Rb \times \left[\frac{V_1}{V_0} \right]^3 + Dc \times Rc \times \left[\frac{V_1}{V_0} \right]^4 \quad (9)$$

Après simplification,

$$\frac{\partial Cd}{\partial V} = \frac{1}{V_1} \times [(2 \times Dm \times Rm) + (3 \times Db \times Rb) + (4 \times Dc \times Rc)] > 0 \quad (10)^{14}$$

où (Rm), (Rb) et (Rc) désignent respectivement les indicateurs de risque pour les accidents matériels, les blessés et les tués. Pour la période 1, il s'agit donc d'indicateurs estimés à partir de la formule.

3.4. LES DOMMAGES LIÉS AU BRUIT

A une vitesse de circulation plus élevée est associée une pollution sonore plus importante (LELONG et alii, 1998 ; LELONG et alii, 1999 ; LELONG et alii, 2000 ; HAMET, 1994 ; SOULAGE, 1994). Une relation croissante entre émission sonore (S) et vitesse (V) peut donc être établie¹⁵ (11).

¹² Les indices (1) et (0) renvoient aux périodes.

¹³ L'indicateur de risque pour les blessés pourra être décomposé en blessés légers et blessés graves.

¹⁴ L'équation (10) est déterminée avec les exposants proposés par NILSSON. Celle-ci devra être adaptée avec les coefficients appropriés si la démarche d'EVANS est suivie.

¹⁵ L'émission sonore dépend entre autres de paramètres cinématiques, mécaniques et d'infrastructure.

$$S=F(V) \text{ et } \frac{\partial S}{\partial V} > 0 \quad (11)$$

Nous reprenons les enseignements du rapport BOITEUX sur la valorisation des dommages liés à la pollution sonore. Ainsi, les dommages monétaires liés à l'émission sonore peuvent être décomposés selon des seuils (BOITEUX, 2001 : 81). Cela signifie que non seulement l'émission sonore est plus importante selon la vitesse de circulation, mais l'importance du dommage unitaire (p_{si}) varie également selon des seuils. Pour tenir compte des autres atteintes à la santé, le dommage associé à la pollution sonore (S_o) est pondéré par un coefficient (k), tel que $k > 1$. Nous obtenons alors le dommage total associé à la pollution sonore (S_{ot}).

$$S_o = S \times p_{si} = F(V) \times p_{si} \quad (12)$$

$$S_{ot} = k \times F(V) \times p_{si} \quad (13)$$

A partir de l'équation (13), il est alors possible de déterminer le coût marginal de la pollution sonore, c'est-à-dire la variation des dommages associés à une vitesse de circulation plus élevée (14).

$$\frac{\partial S_{ot}}{\partial V} = k \times \frac{\partial F}{\partial V} \times p_{si} > 0 \quad (14)$$

3.5. LES DOMMAGES CAUSÉS PAR LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

La circulation est également source de pollution atmosphérique (C_i). Celle-ci prend différentes formes ; entre autres des émissions de dioxyde de carbone (CO_2) noté (C_1), de monoxyde de carbone (CO) noté (C_2), des composés organiques volatiles (COV) noté (C_3) et d'oxyde d'azote (Nox) noté (C_4). Le niveau des émissions polluantes dépend également de la vitesse de circulation. Le coût total associé à la pollution atmosphérique (CPA) est alors défini par la somme des quantités des différentes pollutions pondérées par le dommage monétaire qui leur est associé (16).

$$CPA = p_1 \times C_1(V) + p_2 \times C_2(V) + p_3 \times C_3(V) + p_4 \times C_4(V) = \sum_{i=1}^4 p_i \times C_i(V) \quad (15)$$

Le coût marginal de la vitesse relatif aux émissions polluantes peut être approché par le produit de la variation des émissions (qui dépend de la vitesse de circulation) par le coût du kilogramme du polluant émis dans l'atmosphère (17).

$$\frac{\partial CPA}{\partial V} = \sum_{i=1}^4 p_i \times \frac{\partial C_i}{\partial V} > 0 \quad (16)$$

3.6. DÉTERMINATION DE L'OPTIMUM

Le coût social total (CS) de la circulation automobile sur le réseau interurbain se définit par la somme des gains et des coûts précisés par les équations (3), (5), (9), (13) et (15). Une relation peut être établie entre coût social total et vitesse, dans la mesure où chaque équation comprend la variable vitesse (17).

$$CS=CS(V)=G+Cv+Cd+Sot+CPA \quad (17)$$

Le coût social minimum est atteint lorsque la dérivée première par rapport à la vitesse de l'équation (17) est égale à zéro : $\frac{\partial CS}{\partial V}=0$. Ce résultat implique l'égalisation du coût marginal (ou perte de temps associée à une vitesse moins rapide) aux gains marginaux (représentés par les dommages évités en termes d'accidents, de pertes humaines, de pollutions sonore et atmosphérique et de bruit) (18).

$$\frac{\partial G}{\partial V} = \frac{\partial Cv}{\partial V} + \frac{\partial Cd}{\partial V} + \frac{\partial Sot}{\partial V} + \frac{\partial CPA}{\partial V} \quad (18)$$

L'équation (18) peut être interprétée différemment. Le gain net marginal associé à l'économie de temps réalisée du fait d'une vitesse de circulation plus élevée doit équilibrer le coût marginal représenté par la surconsommation de carburant, l'émission supplémentaire de polluants, les dommages matériels et humains ainsi que les dommages supplémentaires liés à la pollution sonore. Le coût social total est alors minimal pour le niveau de vitesse optimal (V^*).

$$CS^*=CS(V^*) \quad (19)$$

L'élaboration de ce modèle théorique constitue une base méthodologique qu'il convient dorénavant d'éprouver d'un point de vue empirique. Il s'agit d'essayer de déterminer concrètement une vitesse moyenne optimale pour les véhicules légers pour le réseau interurbain, c'est-à-dire pour les routes nationales et départementales (hors autoroute).

4. DÉTERMINATION EMPIRIQUE DE LA VITESSE OPTIMALE POUR LE RÉSEAU INTERURBAIN

La vitesse moyenne optimale pour les déplacements interurbains et pour les véhicules légers est estimée pour l'année 1998. Cependant, la diversité du réseau interurbain qui comprend à la fois des (2x2) voies à circulation rapide et des voies départementales limitées à 90 km/h souligne la prudence qui accompagne une telle démarche. Nous proposons de déterminer une vitesse optimale pour l'ensemble des déplacements interurbains (hors autoroute), mais également d'estimer une valeur moyenne pour les routes nationales et départementales¹⁶. L'année 1998 a été choisie pour des raisons de commodité de disponibilité statistique. Il nous semble qu'elle constitue une bonne appréciation de la situation qui prévalait avant les modifications intervenues

¹⁶ Chaque réseau se caractérise par une forte diversité puisque sur les 27 500 kilomètres de routes nationales, 2 000 kilomètres présentent des caractéristiques autoroutières et 3 000 kilomètres sont constitués d'une chaussée séparée. Le réseau départemental présente également une certaine hétérogénéité en regroupant à la fois des routes nationales déclassées et des départementales de mauvaise qualité.

lors de l'année 2002 qui a vu l'insécurité routière être instaurée au rang de priorité nationale.

4.1. LA VALORISATION DU TEMPS

Le rapport BOITEUX retient une valeur moyenne horaire de 12,20 euros pour une heure de conduite. Cette valeur est avancée pour une distance parcourue supérieure à 80 km pour l'année 1997 (BOITEUX, 2001 : 183). Une valorisation selon la distance parcourue et pour des parcours en interurbain est également disponible (BOITEUX, 2001 : 195). Compte tenu de la relative stabilité des prix entre 1997 et 1998, il sera retenu une valeur de 13,5 euros par heure¹⁷.

Pour l'année 1998, 275 milliards de véhicules kilomètres ont été effectués par l'ensemble des véhicules sur le réseau interurbain, répartis pour 186 milliards pour les routes nationales et 89 pour les routes départementales (U.R.F., 2002 : II-16 et II-17). La part dans la circulation totale attribuable aux véhicules particuliers représente 73,2 % du total. Si cette part est supposée relativement homogène pour l'ensemble des réseaux, le kilométrage effectué pour les parcours interurbains peut être estimé à environ **201,3 milliards** de véhicules kilomètres. Ce kilométrage peut être décomposé selon le réseau routes nationales et routes départementales avec les valeurs respectives de 65,1 (89×0,732) et 136,2 (186×0,732) milliards de véhicules kilomètres.

Une vitesse moyenne¹⁸ de 90 km/h sera retenue pour les deux réseaux. La vitesse moyenne est de 89 km/h sur les routes nationales et de 92 km/h pour les routes départementales (ONSIR, 1999 : 42)¹⁹. Pour tenir compte du coût en temps de l'ensemble des passagers, il est nécessaire de pondérer cette valeur par le nombre moyen d'occupants des véhicules particuliers. Une valeur moyenne de 1,3 passagers²⁰ par véhicule²¹ sera retenue. Le coût total en temps pour les déplacements interurbains en 1998 peut donc être chiffré

¹⁷ L'ensemble des calculs proposés sont en euros de 1998.

¹⁸ Il s'agit d'une moyenne de vitesses instantanées réalisées à partir d'un plan de sondage. Pour la présentation méthodologique, le lecteur peut se reporter à ONSIR, 1999 : 40 et ONSIR, 2003 : 109.

¹⁹ Compte tenu de la taille des réseaux et des flux de circulation, nous pouvons définir le kilométrage moyen effectué l'utilisateur par kilomètre de réseau. Les valeurs sont respectivement pour les routes nationales et départementales de 2 367,3 et 372,9. Cela signifie que les interactions sans doute plus nombreuses sur les routes nationales et que l'effet de congestion explique pour partie la différence de vitesse moyenne constatée. Pour une présentation des différences de débits et d'indice de débit entre les différentes catégories de réseau et illustrant notre propos, le lecteur pourra se reporter à (COMITÉ PROFESSIONNEL DU PÉTROLE, 2003).

²⁰ Cette information m'a été communiquée par Jean-Loup MADRE.

²¹ Le coût en temps est surestimé dans la mesure où il serait nécessaire de déduire les pertes de temps résultant des accidents (congestion, ralentissement, changement d'itinéraire suite à une voie bloquée...). Cette dimension est prise en compte par CROUCH (1976 : 188).

entre **38,79 et 39,25 milliards d'euros**²².

4.2. LES DOMMAGES ASSOCIÉS AUX ACCIDENTS

Les coûts humains

Le rapport BOITEUX propose une valeur statistique normalisée de la vie humaine, ainsi que des valeurs monétaires pour un blessé léger et grave. Les valeurs retenues sont respectivement de 1 million d'euros par vie humaine, 150 000 euros par blessé grave et 22 000 euros par blessé léger (BOITEUX, 2001 : 138).

Pour déterminer les coûts monétaires des dommages corporels, il est nécessaire au préalable de déterminer le nombre de victimes. Nous décomposerons les victimes par catégories d'usagers et selon le réseau (ONSIR/SETRA, 1999). Cependant, les catégories « piéton » et « cycliste » posent problème dans la mesure où les blessures ou le décès de ces usagers résultent d'un choc avec un autre véhicule²³. Nous utiliserons la clé de répartition suivante : les victimes seront réparties selon le poids relatif des victimes « usagers de véhicules i » sur l'ensemble des victimes « usagers de véhicules ». Ainsi si ce poids relatif pour les usagers de véhicules de tourisme est de 70 %, une part de 70 % des victimes de la catégorie « piéton » sera considérée comme le fait de l'usager des véhicules de tourisme. Pour les autres catégories, nous supposons que les victimes subissent seulement les conséquences de leur conduite. Il n'y aurait donc pas d'effet externe. Une autre manière d'interpréter cette hypothèse est de considérer un effet net nul entre les éventuels effets externes réciproques.

Pour l'année 1998, le nombre de victimes associé à l'usage de véhicules de tourisme est estimé à 71 493 et se décompose en 5 172 décès, 16 824 blessés graves et 49 497 blessés légers (Tableau 1). Ces chiffres peuvent être décomposés selon le type de réseau (Tableau 2).

Tableau 1 : Nombre de victimes associé à l'usage d'un véhicule de tourisme pour l'ensemble du réseau interurbain

	Tués	Blessés graves	Blessés légers
Voitures de tourisme	4 595	15 016	45 711
Piétons et cyclistes	577	1 808	3 786
Total corrigé	5 172	16 824	49 497

Source : ONSIR/SETRA, 1999 : 20-21

²² L'estimation de 38,79 milliards d'euros résulte de la somme des estimations pour chaque réseau (12,83 + 25,96) en utilisant les valeurs de vitesse moyenne respective.

²³ Nous faisons une hypothèse similaire pour les cyclistes, même si une chute de bicyclette peut conduire à des blessures, voire dans certains cas à un décès. Nous ne disposons pas d'informations supplémentaires pour affiner notre analyse sur ce point.

Tableau 2 : Nombre de victimes associé à l'usage d'un véhicule de tourisme pour les réseaux route nationale et route départementale

	Tués	Blessés graves	Blessés légers
Total corrigé pour le réseau « route nationale »	1 817	5 355	17 754
Total corrigé pour le réseau « route départementale »	3 355	11 469	31 743

A partir des équations (9) et (10), il est possible de déterminer les coûts humains totaux et marginaux associés à une vitesse de circulation. Pour les comportements de vitesse observés en 1998 sur le réseau national, le coût humain peut être estimé à environ **8,78 milliards d'euros** se décomposant comme suit : 5,17 milliards pour les victimes décédées, 2,52 milliards pour les pertes occasionnées suite à des blessures graves et 1,08 milliards associés à des blessures légères.

Estimation du coût des dégâts matériels

Les sociétés d'assurance sont au centre de la procédure d'indemnisation des dommages humains et matériels. En matière de valorisation de la vie humaine, il existe une différence essentielle entre l'approche assurantielle et celle adoptée par les autorités et certains chercheurs de la communauté scientifique. L'objectif des assureurs est d'essayer de remettre, lorsque cela est possible, la victime dans son état antérieur. L'approche des chercheurs essaie quant à elle de prendre en compte les pertes de production ou les pertes de satisfaction qui sont associées à l'accident. Les chiffres diffèrent donc substantiellement. En effet, les valeurs retenues par la Fédération Française des Sociétés d'Assurance sont respectivement pour le coût moyen d'un décès et d'un blessé de 58 120 et de 15 400 euros pour l'année 1998 (FFSA, 1998 : 21). Il s'ensuit donc une valorisation pour les atteintes corporelles des victimes (conducteurs particuliers circulant sur le réseau national interurbain) estimée à 1,32 milliards d'euros, soit une valeur qui représente 15 % du total des estimations avancées avec les chiffres précisés par le rapport BOITEUX.

Par ailleurs, les dégâts matériels estimés par la FFSA représenteraient environ 75 % des dédommagements totaux²⁴. Ces dommages matériels peuvent donc être estimés à trois fois ceux des dommages humains, soit **3,96 milliards d'euros**. Ce montant représente environ 45 % des dommages humains totaux évalués à partir des chiffres du rapport BOITEUX. Cette part estimée sera supposée stable. En conséquence, l'évolution des dommages matériels suite à une augmentation de la vitesse de circulation pourra être estimée à partir de celle des dommages corporels. Pour conclure sur l'estimation des dommages matériels et humains, ceux-ci sont de l'ordre de **12,73 milliards d'euros** pour l'année 1998.

²⁴ Je dois cette précision à M. POLLET de la Fédération Française des Sociétés d'Assurance.

4.3. LES COÛTS ASSOCIÉS À LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

L'estimation des dommages associés à la pollution atmosphérique constitue une difficulté certaine du fait de la diversité des composants émis. Cette difficulté s'explique également par les limites des techniques permettant de l'appréhender. En effet, les dommages associés à la pollution résultent plus d'un effet d'association d'émissions individuelles que de l'émission individuelle en tant que tel.

Les formules d'émission des polluants pour les véhicules diesel et essence seront utilisées pour estimer les dommages, ainsi que pour déterminer les consommations de carburant. Celles-ci établissent des relations entre les quantités rejetées en gramme par kilomètre parcouru selon la vitesse de circulation. Elles seront pondérées par le kilométrage effectué par chaque type de véhicule et par la valeur du dommage associée (CEMT, 1999). Pour les véhicules à essence et diesel, les pollutions du monoxyde d'azote, du dioxyde de carbone et des hydrocarbures seront considérées. La répartition du kilométrage entre véhicules à essence et diesel constituera le coefficient de pondération avec des parts respectives de 55 % et 45 %. Les prix retenus sont de 4 euros par kilogramme émis d'hydrocarbure, de 4 euros également par kilogramme émis pour le monoxyde d'azote et de 0,05 euro par kilogramme émis pour le dioxyde de carbone (CEMT, 1999 : 220-230). En décomposant le kilométrage selon le type de réseau, il devient alors possible d'estimer les coûts total et marginal de chaque émission (Tableau 3). L'ensemble du développement est présenté en Annexe 1.

Tableau 3 : Coût total et coût marginal selon les réseaux (milliards d'euros)

Réseau interurbain	Coût Total	$CT_p=3,732-0,061 \times V+4,43 \times 10^{-4} \times V^2+\frac{14,03}{V}+1,67 \times V^{-0,937}$
	Coût Marginal	$Cm_p=-0,061+8,86 \times 10^{-4} \times V-\frac{14,03}{V^2}-1,564 \times V^{-1,937}$
Réseau routes nationales	Coût Total	$CT_{prn}=1,19-0,019 \times V+1,42 \times 10^{-4} \times V^2+\frac{4,48}{V}+0,53 \times V^{-0,937}$
	Coût Marginal	$Cm_{prn}=0,019+2,83 \times 10^{-4} \times V-\frac{4,49}{V^2}-0,5 \times V^{-1,937}$
Réseau routes départales	Coût Total	$CT_{prd}=2,542-0,042 \times V+3,01 \times 10^{-4} \times V^2+\frac{9,55}{V}+1,14 \times V^{0,937}$
	Coût Marginal	$Cm_{prd}=0,042+6,03 \times 10^{-4} \times V-\frac{9,54}{V^2}-1,064 \times V^{-1,937}$

Pour l'année 1998, les dommages associés à la pollution atmosphérique peuvent être estimés à **2,01 milliards d'euros** dont 0,67 milliards pour les routes nationales et 1,34 milliards pour les routes départementales.

4.4. LES COÛTS ASSOCIÉS À LA CONSOMMATION DE CARBURANT

L'augmentation de la vitesse de circulation des véhicules conduit à une augmentation de la consommation de carburant. Il convient donc d'établir la relation entre la consommation des différents carburants et la vitesse, puis de la pondérer par leur prix respectif.

Le parc des automobiles est composé de véhicules diesel, tandis que d'autres utilisent du supercarburant²⁵. En 1998, les ventes de super plombé sont estimées à 6,7 millions de m³, celles de super sans plomb à 12,6 millions de m³, à 30,4 millions de m³ pour le gazole et à 0,28 millions de m³ pour le gaz liquéfié (URF, 2000 : II-22). Compte tenu de la faible proportion du gaz liquéfié, le modèle retiendra uniquement des formules de consommation pour les véhicules à essence et diesel (URF, 2000 : III-12 et III-13). Par ailleurs, de multiples formules de consommation sont disponibles pour différents modèles de véhicule ; un véhicule considéré comme représentatif sera donc choisi.

Pour évaluer les dépenses de carburant, les formules de consommation seront pondérées selon l'importance du kilométrage effectué. La pondération retenue est 55 % pour les véhicules à essence et 45 % pour les véhicules diesel (URF, 2000 : III-16). Elle est supposée homogène pour les routes nationales et départementales. Par ailleurs, les prix des carburants retenus seront les prix hors taxe. Le prix moyen est de 0,18 euro par litre pour les différents carburants (URF, 2000 : III-12 et III-13). Les prix de vente se différencient, lorsque sont intégrées les différentes taxes. Le poids des taxes varie de 51 % pour le gazole, à 81 % pour le super plombé et à 75 % pour le sans plomb 1998.

Pourquoi avons-nous retenu le prix du carburant hors-taxe et non toutes taxes comprises ? Lorsqu'un usager décide de sa vitesse de circulation, il intègre dans sa prise de décision le prix de vente du carburant, c'est-à-dire intégrant les différentes taxes. Cependant, au niveau de la société, le produit des taxes sur le carburant représente des ressources qui sont redistribuées à la collectivité. Les deux démarches renvoient à deux réalités différentes. L'intégration des prix de vente dans l'analyse consiste à raisonner sur le comportement individuel du conducteur et de tenir compte de mesures d'internalisation. En effet, les taxes sur le carburant visent entre autres à internaliser les effets externes, autrement dit à rapprocher le coût marginal privé du coût marginal social. Le conducteur intègre une partie des dommages qu'il occasionne du fait de son choix de vitesse. Cette approche ne doit pas être confondue avec celle qui vise à déterminer le coût social de conduites existantes, c'est-à-dire considérant comme donné le cadre institutionnel. Ne pas intégrer le produit fiscal sur le carburant conduit à négliger une réalité économique évidente, mais également à gonfler artificiellement le coût social

²⁵ Il s'agit du supercarburant plombé et sans plomb. D'autres véhicules circulent au gaz de pétrole liquéfié.

total. En effet, cela consiste de fait à négliger une ressource pour la collectivité qui représente près de 26 milliards d'euros pour l'année 1998²⁶ et à introduire un biais dans la détermination de la vitesse optimale. Il doit être souligné que cette approche se distingue de celle adoptée dans d'autres travaux sur des préoccupations similaires (CAMERON, 2002 ; RIETVELD et alii, 1996).

A partir des formules de consommation pour les véhicules essence et diesel, du kilométrage effectué et des prix des carburants, nous pouvons estimer les fonctions de coût total et de coût marginal de carburant pour l'ensemble du réseau interurbain, les routes nationales et les routes départementales²⁷.

$$Cvt=5,11-0,02\times V+\frac{1,9}{V}+5,99\times 10^{-4}\times V^2+0,12\times V^{-0,937}+0,07\times V^{-0,574}$$

et donc,

$$Cvm=-0,02-\frac{1,9}{V^2}+1,19\times 10^{-3}\times V-0,11\times V^{-1,937}-0,04\times V^{-1,574}$$

Pour l'année 1998, les dépenses totales de carburant pour le réseau interurbain peuvent être estimées entre **8,16 et 8,24 milliards d'euros**, dont 2,58 et 5,66 pour les déplacements sur routes nationales et routes départementales respectivement.

4.5. LES COÛTS ASSOCIÉS AU BRUIT

La circulation automobile est une source de bruit, qui provient à la fois du moteur mais également du contact des pneus avec le revêtement (BESNARD et alii, 2003 : 6). Par ailleurs, l'intensité du bruit dépend également de la qualité du revêtement, de la proximité des habitations, des éventuelles accélérations et de la vitesse de circulation. La présente recherche utilisera une formule validée pour les véhicules légers à vitesse stabilisée pour des revêtements bruyants, permettant ainsi d'associer une vitesse de circulation à une intensité de bruit (Db(A)). La formule estimée est $L(V) = 80,0 + 34,5 \log(V/90) + 15,5 \log(V/90)^2$, avec log, le logarithme décimal²⁸.

Cette relation indique que pour une vitesse de référence de 90 km/h, le niveau de bruit est au minimum de 80 décibels. Pour une vitesse de 100 km/h, le niveau de bruit est de 83 décibels environ.

Le rapport BOITEUX s'est intéressé à la valorisation du bruit (BOITEUX, 2001 : 77 et s.). La valorisation des nuisances sonores est estimée à partir de la dépréciation du prix de transaction ou de la valeur locative des biens immobiliers (BOITEUX, 2001 : 80). En 1994, les nuisances sonores ont été

²⁶ Il s'agit de la valeur des taxes prélevées sur l'ensemble des ventes de carburant pour l'année 1998.

²⁷ L'annexe 2 détaille l'ensemble des formules utilisées.

²⁸ La relation estimée m'a été communiquée par Joël LELONG.

estimées à 0,3 % du PIB. Le rapport précise que l'intensité de dépréciation dépend du niveau de bruit. En fait, les auteurs définissent des paliers. Pour un niveau de bruit supérieur à 75 décibels, le taux de dépréciation serait de 1,1 % par décibel (BOITEUX, 2001 : 81). Or la vitesse moyenne pour le réseau interurbain, décomposé en routes nationales et départementales, se situe à un niveau bien supérieur. En conséquence, l'expression des dommages (relatifs à la pollution sonore) provoqués par la vitesse prend la forme d'une relation qui varie selon le niveau de la vitesse.

Le coût total associé aux nuisances générées par la circulation automobile en interurbain peut faire l'objet d'une estimation grossière. Pour atteindre cet objectif, le prix du mètre carré avancé par le rapport BOITEUX a été actualisé. Bien que ce chiffre n'ait pas une grande signification, compte tenu de la disparité des prix selon le type de logement, sa présence en milieu urbain ou rural, il permet toutefois de disposer d'un ordre de grandeur. Ce prix a été estimé à 5,64 euros par mètre carré. La population résidant dans des villes de moins de 50 000 habitants est estimée en 1998 à 47,8 % de la population totale, soit environ 27,7 millions de personnes environ. En prenant en compte un nombre moyen de personnes par habitation de 2,5 personnes (MINISTÈRE DES AFFAIRES ÉTRANGÈRES, 2003), le nombre d'habitations potentiellement concernées par les pollutions sonores du fait de la circulation en interurbain peut être estimé à 11 millions²⁹. Par ailleurs, la superficie moyenne d'une habitation est estimée à 90 m². Ainsi, les nuisances sonores potentielles, dont l'origine est la circulation automobile interurbaine, peuvent être évaluées à **10 millions d'euros** pour 1998. Nous ne disposons pas d'informations supplémentaires concernant le nombre d'habitations concerné par les éventuelles gênes ressenties et l'importance de ces gênes. Ainsi cette valeur doit être comprise comme une borne supérieure des dommages subis. Celle-ci est sans doute fortement surestimée. Cependant, cela ne portera pas atteinte aux résultats dans la mesure où les dommages associés à la pollution sonore sont relativement faibles par rapport aux autres dommages.

Nous devons faire plusieurs remarques quant à la prise en charge du coût du bruit. La première est relative aux différentes sources dont peut provenir le bruit : circulation routière, transport ferroviaire, industrie et autres activités. En conséquence, en affectant les coûts à la seule circulation routière, les dommages sont surestimés. Il conviendrait à ce titre de partager les dommages en conséquence. Par ailleurs, un raisonnement à la marge pourrait également modifier l'estimation des dommages dans la mesure où la dégradation est le résultat d'une première atteinte, par exemple la proximité d'une ligne de chemin de fer. En cela la contribution de la circulation automobile peut être marginale (par son intensité) ou ne conduire à aucune dégradation supplémentaire. Dans ce cas, l'impact marginal de la pollution

²⁹ Une étude récente avance un nombre de 200 000 logements qui subirait une gêne due au bruit d'une intensité supérieure à 65 décibels (le Monde du 12 juillet 2003).

sonore de la circulation automobile est nulle. Par ailleurs, les sections des routes nationales et départementales se situent essentiellement en rase campagne, ce qui signifie que l'impact sur les zones résidentielles riveraines est relativement faible. Compte tenu des différents éléments exposés, nous excluons les coûts associés à la pollution sonore.

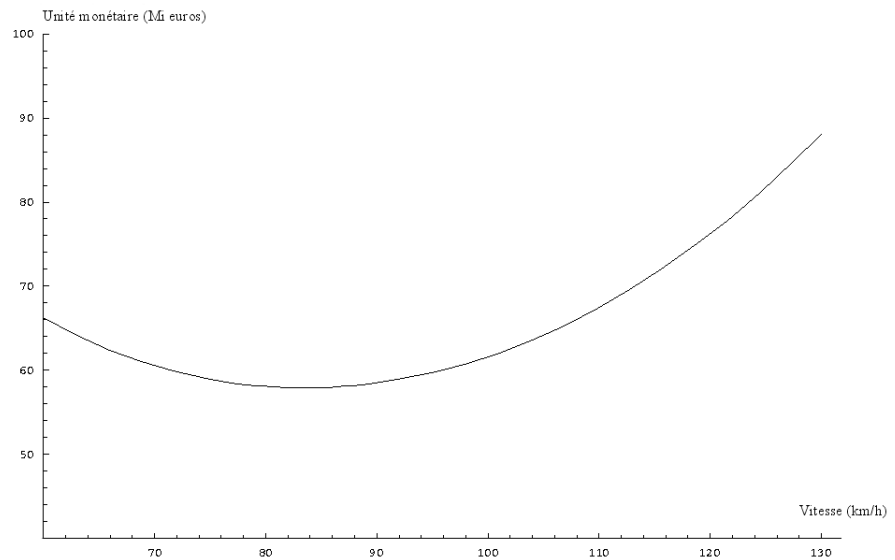
4.6. DÉTERMINATION DES NIVEAUX DE VITESSE OPTIMALE

L'ensemble des relations estimées permet de définir la fonction de coût social total et la fonction de coût marginal pour le réseau interurbain. La décomposition entre routes nationales et routes départementales permettra également d'affiner les résultats. Le Tableau 4 présente les résultats estimés et le calcul de l'optimum à partir des équations préalablement définies. Le Schéma 6 illustre la fonction de coût social total.

Tableau 4 : Vitesse optimale selon le réseau

	Réseau interurbain	Routes nationales	Routes départementales
Vitesse optimale	83,54 km/h	81,36 km/h	85,24 km/h

Schéma 6 : Courbe de coût social pour différents niveaux de vitesse pour le réseau interurbain



Ces résultats appellent quelques remarques. La première indique que la vitesse optimale est inférieure à la vitesse moyenne du réseau. Néanmoins cette vitesse moyenne reste proche des niveaux pratiqués par les conducteurs.

La deuxième remarque souligne un écart substantiel entre les différents réseaux. La vitesse optimale est plus élevée pour les routes départementales. Cette différence peut sembler contre-intuitive. Cependant, nous avons souligné l'existence d'une utilisation plus intensive du réseau des routes

nationales par rapport à celle des routes départementales. Le phénomène de congestion influencerait ainsi le niveau de vitesse pratiquée. La présence de nombreux véhicules conduirait à des ralentissements et à une multiplication des interactions. Ceux-ci se répercuteraient sur le bilan accidentologique du réseau. Une autre explication susceptible d'expliquer la différence de vitesse pratiquée proviendrait d'efforts différenciés de surveillance de la part des forces de l'ordre concernant les pratiques de vitesse. Certes les réseaux des routes nationales présenteraient des caractéristiques techniques autorisant des vitesses de circulation plus élevées. Cependant, dans la pratique, des concentrations plus importantes de véhicules et des efforts de détection plus relativement plus intenses influeraient sur les pratiques (CARNIS, 2001b : 547-552). Ces effets sur les pratiques de vitesse compenseraient alors celui associé à un réseau de meilleure qualité.

Une troisième remarque est relative à la valorisation du temps retenue pour le conducteur et les passagers. Celle-ci était de 13,5 euros par heure. Cette valeur représente en fait la rémunération brute moyenne d'un salarié en 1998 (MINISTÈRE DU TRAVAIL ET DE LA SOLIDARITÉ, 2003). Or si l'analyse se place au niveau collectif, la valeur d'une heure de travail doit être comprise comme ce qu'elle rapporte en totalité au niveau de la collectivité, c'est-à-dire le niveau de production qui lui est associée. En conséquence, la part correspondant aux cotisations patronales représente une création de richesses qui doit être intégrée au calcul. La valeur horaire devient alors 19,08 euros par heure en multipliant la précédente valeur par 1,4 (40 % du coût du travail est composé de charges sociales patronales).

La quatrième remarque concerne la relation établie entre l'évolution du nombre de victimes et la vitesse. En effet, cette relation suppose implicitement l'implication de la vitesse comme facteur explicatif dans l'ensemble des accidents. Ne disposant pas d'informations particulières sur le niveau d'implication de ce facteur dans les accidents et afin d'éviter toute interprétation erronée d'un phénomène dont les causes sont multi-factorielles, de nouveaux calculs de la vitesse optimale sont réalisés pour des niveaux d'implication différents. En effet, la non prise en compte de cette correction peut conduire à surestimer les coûts humains et matériels attribuables au facteur vitesse et à diminuer le niveau de vitesse optimale. Le Tableau 5 présente les résultats obtenus en revalorisant le temps et en prenant en compte des degrés différents d'implication du facteur vitesse.

Selon le degré d'implication du facteur vitesse, la vitesse optimale varie entre 87 et 104 km/h. Cet intervalle est donc relativement proche du niveau de vitesse moyenne de 90 km/h. L'intervalle de vitesse proposé pour le réseau des routes nationales comprend le niveau de vitesse moyenne qui y est pratiquée (89 km/h). En ce qui concerne le réseau des routes départementales, le niveau est également relativement proche de l'intervalle proposé.

Tableau 5 : Vitesse optimale selon le réseau et selon le degré d'implication de la vitesse comme facteur explicatif des accidents

Part explicative	Réseau Interurbain	Routes Nationales	Routes Départementales
50%	101,62 km/h	99,02 km/h	103,63 km/h
60%	98,54 km/h	96,03 km/h	100,52 km/h
70%	95,95 km/h	93,51 km/h	97,90 km/h
80%	93,71 km/h	91,33 km/h	95,63 km/h
90%	91,74 km/h	89,42 km/h	93,64 km/h
100%	89,99 km/h	87,73 km/h	91,87 km/h

Les résultats indiquent un niveau de vitesse optimale plus élevé sur le réseau routes départementales que celui du réseau routes nationales reflétant ainsi les premiers résultats. Si nous supposons des parts explicatives du facteur vitesse différente pour (certaines portions du) le réseau départemental et (certaines voies du) le réseau routes nationales³⁰, les conclusions doivent être modulées en conséquence. Ainsi sur les routes nationales aux caractéristiques autoroutières, la part explicative du facteur vitesse peut être considérée comme relativement faible, voire inférieure à la part explicative de 50 %. Dans ce cas, la vitesse optimale se rapproche sans doute du niveau de la limite de vitesse de 110 km/h.

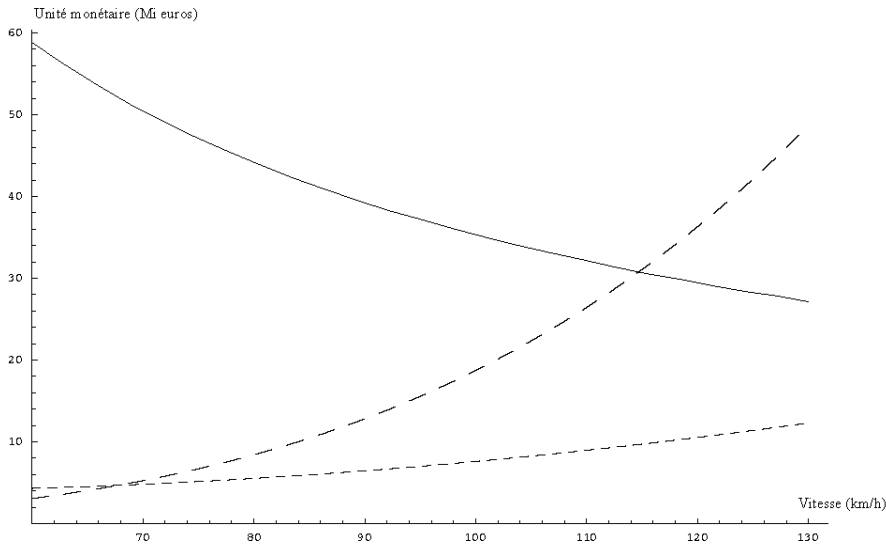
Ces résultats permettent également d'émettre des conclusions quant au caractère optimal de la législation existante. Les limites de vitesse à 90 km/h pour les routes départementales et certaines routes nationales semblent être efficaces selon le critère du coût social. De même, la limitation des deux fois deux voies limitées à 110 km/h semble être un bon compromis. En effet, si la vitesse obtenue est corrigée d'un coefficient relatif à la tolérance administrative en matière de mesure de vitesse (+ 10 %), l'éventail des vitesses obtenu correspond globalement aux limitations de vitesse existantes. Les résultats de ce modèle nous amèneraient donc à conclure à une législation optimale du point de vue économique.

La détermination de la vitesse optimale permet également d'identifier deux types de conduite néfastes : celles qui se situent largement au-dessus et celles qui se situent en-dessous des limites de vitesse. Les vitesses excessives impliquent des coûts en termes d'insécurité que ne peuvent compenser les gains en temps, tandis que les vitesses trop faibles engendrent des pertes de temps et des dépassements pouvant conduire à la survenance d'accidents (TRB, 1998). Dans le cadre de cette étude, la relation entre les accidents et la vitesse de circulation est supposée être de type exponentielle et monotone, alors que certains travaux ont mis en évidence la possibilité d'un point de retournement possible du nombre d'accidents en présence de vitesses trop faibles ; le problème vient d'une homogénéité insuffisante des pratiques de conduite.

³⁰ Nous avons souligné le caractère hétérogène des différents réseaux.

L'analyse de la composition du coût social indique que les composantes essentielles sont les coûts en termes de temps perdu et les pertes humaines et matérielles. En conséquence, les hypothèses adoptées concernant la valorisation des heures de trajet sauvegardées ou les pertes humaines et matérielles sont importantes pour la détermination du niveau de la vitesse optimale.

Schéma 7 : Composantes du coût social selon le niveau de vitesse de circulation (en milliards d'euros)



_____ : coûts en temps ;
 _____ : dommages matériels et humains ;
 - - - - : dépenses de carburant et coûts associés à la pollution

Nous avons donc procédé également à une estimation de la vitesse optimale en faisant varier la valeur du temps, l'importance des dommages matériels et la valeur des dommages corporels. Il apparaît que la vitesse optimale est relativement peu sensible à la valeur du temps, puisque elle varie seulement de 9 % (par rapport à la vitesse optimale de 83,54 km/h) pour une valeur du temps accrue de 50 % (Tableau 6).

Tableau 6 : Vitesse optimale et valeur du temps

Valeur du temps (valeur initiale : 13,5 euros)	Vitesse optimale (km/h) (vitesse optimale initiale : 83,54 km/h)
+ 10 %	85,21 km/h
+ 20 %	86,87 km/h
+30 %	88,43 km/h
+40 %	89,89 km/h
+ 50 %	91,27 km/h

La modification du poids des accidents matériels n'influence pas substantiellement le niveau de la vitesse optimale, celle-ci variant entre 82,97 km/h

et 85,10 km/h (Tableau 7). Il en est de même lorsque varie la valeur des dommages corporels (Tableau 8).

Tableau 7 : Vitesse optimale et poids des accidents matériels

Poids des dommages matériels	Vitesse optimale
1,30	85,10 km/h
1,35	84,53 km/h
1,40	83,97 km/h
1,50	82,93 km/h
1,55	82,97 km/h

Tableau 8 : Vitesse optimale et variation des dommages corporels

Variation de la valeur du tué	Vitesse optimale	Variation de la valeur du blessé	Vitesse optimale
- 20 %	85,53 km/h	- 20 %	84,58 km/h
+ 20 %	81,64 km/h	+ 20 %	82,37 km/h
+ 40 %	80,07 km/h	+ 40 %	81,35 km/h
+ 50 %	79,35 km/h	+ 50 %	80,87 km/h
+ 80 %	77,41 km/h	+ 80 %	79,48 km/h
+ 100 %	76,28 km/h	+ 100 %	78,62 km/h

Seule une variation importante de la valeur du tué (au moins + 50 %) ou du blessé grave (au moins + 80 %) conduit à une vitesse optimale inférieure à 80 km/h. En conséquence, la diminution de la vitesse limite à 80 km/h sur le réseau interurbain exigerait la prise en compte de valeurs difficilement justifiables compte tenu de la différence existant avec les indemnités décidées par les tribunaux. Ces différentes estimations confirment également le caractère optimal des limitations existantes.

5. L'IMPORTANCE DU CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL

La prise en compte du contexte environnemental met l'accent sur l'existence d'un système et de son ajustement à la suite de la mise en œuvre d'une politique publique. Le modèle développé repose sur l'hypothèse d'un équilibre stable. Ainsi les flux de circulation sont supposés être insensibles à la variation de la vitesse de circulation, ou tout du moins les éventuels flux sortants équilibrent les flux entrants³¹. Or il conviendrait d'intégrer dans ce genre d'étude (mais ne faisant pas l'objet de ce papier) les facteurs influençant la modification des flux. La variation de la vitesse de circulation peut également produire des effets sur la composition de ce flux. Quels sont les déterminants de l'usage des modes de transport individuel et collectif?

³¹ Il ne s'agit pas ici d'infirmer l'existence d'une relation entre vitesse et débit de circulation, mais de souligner que le modèle considère un point particulier de cette relation.

Quelle est l'éventuelle intensité du taux de substitution entre ces modes alternatifs ? Existe-t-il des effets de déport de certains axes vers d'autres ?

Des considérations liées au partage de la voirie doivent être également intégrées. Quelle devrait être la place des véhicules lourds dans le partage de la voirie ? Comment intégrer la circulation de véhicules introduisant à l'évidence de l'hétérogénéité parmi les vitesses de circulation (voiturettes) ? Cette analyse se limite à la vitesse de circulation des véhicules particuliers, mais celle-ci ne peut ignorer les contraintes de circulation dans lesquelles se trouvent ceux-ci. Les flux de circulation ne peuvent pas être considérés comme homogènes. Si l'on utilise une analogie technique, les éléments transitant par les canaux de transmission s'avèrent être de différentes tailles et se déplacent à des vitesses distinctes. Quelles en sont les conséquences ? Faut-il intégrer des limites de vitesse différenciées ?

La détermination d'une vitesse optimale pour un réseau type ignore également les possibilités d'ajustement par la localisation des activités. Ainsi des vitesses de circulation trop faibles peuvent conduire à des rapprochements entre les lieux d'habitation et les lieux de travail. L'évolution des localisations peut également conduire à une spécialisation des zones géographiques en lieux de résidence ou d'activités industrielles. Cet impact sur l'usage du sol implique alors des coûts d'aménagement, de changement de localisation qui ne sont pas pris en compte dans la fonction de coût social utilisée.

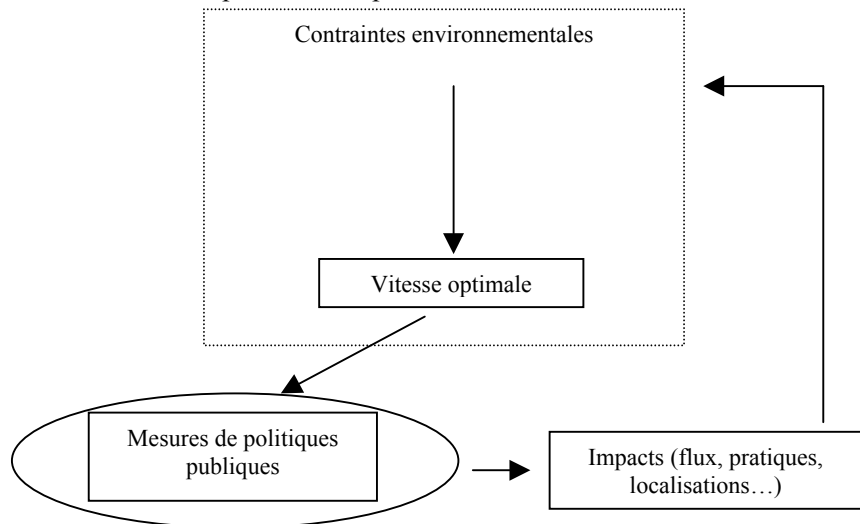
Une autre dimension est relative aux implications d'ordre psychique. Comment intégrer le stress lors des différents types de conduite, valoriser le sentiment d'insécurité, le confort associé à des conduites « apaisées » ou encore le plaisir de circuler sans contrainte. Le rapport BOITEUX fait état d'études concernant la valorisation de certains attributs qualitatifs pour les transports collectifs (sécurité, services offerts, propreté...) (BOITEUX, 2001 : 205). L'allocation marchande permet d'intégrer ces dimensions par la prise en compte des prix de réserve et des coûts d'opportunité des différents usagers. Or cet outil n'est pas disponible dans le cadre de l'usage collectif et libre de la ressource routière.

La procédure de détermination de la vitesse optimale repose par ailleurs sur des enseignements reflétant une structure environnementale donnée, elle-même caractérisée par des contraintes techniques et juridiques. Ainsi, les formules de consommation de carburant reflètent la technologie disponible. Celles-ci évolueront avec le progrès technique et sont plus ou moins influencées par les législations existantes (CEMT, 1977 : 10 et s.). De manière similaire, les qualités de revêtement des chaussées évoluent et permettent d'internaliser dans une certaine mesure les effets externes associés au bruit. Le cadre juridique constitue également une contrainte. Les normes de pollution incitent les constructeurs à mettre sur le marché des véhicules plus respectueux de l'environnement, tandis que les règles de responsabilité

et le caractère adapté des indemnités influencent la prise de risque et les comportements de conduite. Ce cadre juridique peut évoluer et modifier en retour les arbitrages réalisés par les conducteurs et le niveau de vitesse optimale. De même, la taxation des carburants modifie la composition du parc, peut diriger l'achat des consommateurs vers certains véhicules plus ou moins polluants et influencer le style de conduite en l'orientant vers des pratiques moins consommatrices d'énergie (DAHL, 1979). Enfin, le cadre adopté repose sur un système de répression et de sanction particulier, qui peut également modifier la distribution des vitesses sans que la vitesse moyenne évolue (CARNIS, 2001a).

Ces contraintes constituent une forme de dépendance de chemin dans laquelle sont insérées les autorités. Celui-ci limite les arbitrages potentiels pour déterminer une vitesse optimale et contraint l'intervention publique (Schéma 8). La politique publique peut conduire à une modification du cadre initial par un cheminement spécifique. En cela, la question essentielle est de déterminer si une politique donnée peut modifier substantiellement l'équilibre initial pour l'orienter vers un autre équilibre ou si l'équilibre initial est relativement stable, ce qui conduirait à distinguer équilibre de court terme et équilibre de long terme. Cette dimension souligne également de peser les choix de politique publique à l'égard de dimensions structurelles. A ce titre, le développement de réseaux routiers permettant de circuler à une vitesse élevée, mener une politique favorable en matière d'équipement de véhicules diesel sont des choix de long terme qui ne peuvent être corrigés rapidement.

Schéma 8 : La prise en compte des contraintes environnementales



La dimension environnementale est donc fondamentale et ne peut être négligée. Néanmoins, le modèle présenté est beaucoup plus adapté pour déterminer des vitesses optimales de circulation dans le cadre d'horizons temporels de courte durée. Il permet également de donner une appréciation

sur ce qui peut être justifié économiquement et ce qui ne peut l'être. Cette perspective permet en outre d'introduire une forme de rationalisation pour les choix publics qui ne peuvent se contenter de simples déclarations d'intention ou refléter de manière artificielle les préférences d'une partie des usagers.

7. CONCLUSION

Le modèle développé constitue un premier essai de détermination d'une vitesse optimale pour les véhicules particuliers pour les trajets interurbains (hors autoroute) en France. D'un point de vue économique (avec comme critère le coût social), la législation actuelle pour le réseau interurbain peut être considérée comme socialement optimale.

En soulignant les coûts associés au temps de transport, mais également la dimension monétaire des dommages matériels et humains, le modèle cerne les conséquences d'une décision publique qui intégrerait ou non dans son approche la dimension économique. Lorsque les autorités décident d'imposer, d'abaisser ou de relever une limite de vitesse, elles imposent implicitement ou explicitement un arbitrage particulier en termes de coûts sociaux. Cet arbitrage a pour conséquence de définir des gagnants et des perdants qui sont l'objet de transferts de revenu. Les premiers se voient attribuer un revenu (vie sauvegardée en obligeant les autres usagers à modifier leur usage de la route (diminution de la limite de vitesse), gains de temps sans en subir l'ensemble des conséquences (augmentation de la limite de vitesse)). Les perdants sont ceux qui subissent des coûts supplémentaires liés à l'imposition des conséquences des modes d'utilisation des autres usagers. Quelle que soit la politique menée, un processus de redistribution est à l'œuvre, qui spécifie les gagnants et les perdants.

Les apories de cette analyse ont été soulignées avec la difficulté d'intégrer certains effets produits par une limite de vitesse sur le cadre environnemental. L'impossibilité pratique de valoriser certains aspects du choix auquel sont confrontées les autorités indique à la fois la nécessité de déterminer des modes d'allocation différents de ceux existants et capables d'intégrer ces dimensions. Elle définit également un espace de cohabitation pour différentes approches, au sein duquel l'analyse économique doit désormais prendre toute sa place.

Remerciements : L'auteur remercie Jean-Loup MADRE, Michel ANDRÉ, Joël LELONG et Alexandre DEPIRE pour leur aide précieuse.

BIBLIOGRAPHIE

BESNARD F., BERENGIER M., DOISY S., FÜRST N., HAMET J.-F., LELONG J., PALLAS M.-A. (2003) The Procedure for Updating the Vehicle Noise Emission Values of the French "Guide du Bruit". Communication à **Euronoise**, Naples, 6 pages.

BOITEUX M. (2001) **Transports : choix des investissements et coût des nuisances**. Commissariat Général du Plan.

BUTTON K. (1993) **Transport Economics**. London, Edward Elgar (2nd Ed).

CAMERON M. (2002) **Estimation of the Optimum on Urban Residential Street**. Australian Transport Safety Bureau, Monash University Accident Research Centre.

CAMERON M., DELANEY A., DIAMANTOPOULOU K., LOUGH B. (2003) **Scientific Basis for the Strategic Directions of the Safety Camera Program in Victoria**. Monash University Accident Research Centre, Report n° 202.

CARLSSON G. (1997) Cost-Effectiveness of Information, Campaigns and Enforcement and the Costs and Benefits of Speed Changes. Communication au **European Seminar in Luxembourg "Cost-Effectiveness of Road Safety Work and Measures"**, 12 pages.

CARNIS L. (1999) De l'analyse économique en matière de gestion du risque routier. **Recherche-Transports-Sécurité**, n° 65, pp. 21-34.

CARNIS L. (2001a) L'apport de l'analyse économique au contrôle des excès de vitesse. **Politique et Management Public**, Vol. 19, n° 2, pp. 83-103.

CARNIS L. (2001b) **Entre intervention publique et initiative privée : une analyse économique en sécurité routière, une application aux législations sur la vitesse**. Université de Reims Champagne-Ardenne (Thèse de doctorat en sciences économiques).

COHEN S., DUVAL H., LASSARRE S., ORFEUIL J.-P. (1998) **Limitations de vitesse : les décisions publiques et leurs effets**. HERMES, 199 p.

CEMT (CONFERENCE EUROPEENNE DES MINISTRES DES TRANSPORTS) (1977) **Coûts et avantages des limitations générales de vitesse**. Paris, CEMT (Table ronde 37).

CEMT (CONFERENCE EUROPEENNE DES MINISTRES DES TRANSPORTS) (1999) **Des transports efficaces pour l'Europe, politiques pour l'internalisation des coûts externes**. Paris, CEMT.

COMITE PROFESSIONNEL DU PETROLE (2003) **Note d'information économique**. n° 419.

CROUCH R.L. (1976) A Framework for the Analysis of Optimum Maximum Highway Speed Limits and Their Optimal Enforcement. **Accident Analysis and Prevention**, Vol. 8, pp. 187-199.

DAHL C. (1979). Consumer Adjustment to a Gasoline Tax. **The Review of Economics and Statistics**, Vol. LXI, n° 3, pp. 427-432.

ELVIK R. (2002) Optimal Speed Limits, Limits of Optimality Models. **Transportation Research Record**, 1818, paper n° 02-2092, pp. 32-38.

FEDERATION FRANÇAISE DES SOCIÉTÉS D'ASSURANCE (2003) **Assurance automobile : les sinistres corporels en 2001**. Direction des études, des statistiques et des systèmes d'information, Fédération Française des Sociétés d'Assurance.

FEDERATION FRANÇAISE DES SOCIÉTÉS D'ASSURANCE (2002) **Le marché de l'assurance automobile**. Direction des études, des statistiques et des systèmes d'information, Fédération Française des Sociétés d'Assurance.

GHOSH D., LEES D., SEAL W. (1975) Optimal Motorway Speed and Some Valuations of Time and Life. **Manchester School Economic and Social Studies**, Vol. 43, pp. 134-143.

GROUPE D'ETUDE P.R.D.A. ACCIDENTS DE LA ROUTE (1969) **Étude pilote de préparation rationnelle des décisions concernant les accidents de la route, titre 10 – annexe 8 : la limitation de vitesse**.

HAMET J.F. (1994) Niveau de bruit d'un véhicule au passage : L_{eq} ou L_{max} . Utilisation de la signature acoustique pour valider la relation entre ces deux quantités. **Mesure des bruits routiers et ferroviaires**, INRETS (Coll. Actes INRETS n° 36).

HAUER E. (1971). Accidents, Overtaking and Speed Control. **Accident Analysis and Prevention**, Vol. 3, pp. 1-13.

KALLBERG V.-P., TOIVANEN S. (1998) Framework for Assessing the Effects of Speed. **9th International Conference Road Safety in Europe**, September 21-23, Bergish Gladbach.

JONDROW J., BOWES M., LEVY R. (1983) The Optimal Speed Limit. **Economic Inquiry**, Vol. 21, n° 3, pp. 325-336.

LELONG J., LECLERCQ L. (1998) Vers une meilleure évaluation des émissions acoustiques routières en milieu urbain. **Caractériser et modéliser le bruit des transports en milieu urbain. Journée spécialisée du 28 mai 1998** (J-F. HAMET, J. LAMBERT, J. LELONG (dir.)), INRETS, pp. 45-55 (Coll. Actes Inrets n° 66).

LELONG J., MICHELET R. (1999) Effect of Acceleration on Vehicle Noise Emission. Communication au **137th Meeting of the Acoustical Society of America and the 2nd Convention of the European Acoustics Association**, Berlin, 14-19 march.

LELONG J., MICHELET R. (2000) **Véhicules légers : émission acoustique aux différentes allures urbaines et interurbaines**. Bron, INRETS (Rapport LTE n° 2024).

McKENZIE R. B., TULLOCK G. (1975) **The New World of Economics**. Richard D. Irwin, Inc.

MINISTERE DES COMMUNICATIONS (1971) **La limitation généralisée de la vitesse en dehors des agglomérations**. Paris.

MINISTERE DES AFFAIRES ETRANGERES (2003) **Les modes de vie**. Paris (www.France.diplomatie.fr/France/fr/societe/societe01_1.html).

MONASH UNIVERSITY ACCIDENT RESEARCH CENTRE (2001) **Evaluation of a 50 KM/H Default Urban Speed Limit for Australia**. National Road Transport Commission.

NILSSON G. (1981) The Effects of Speed Limits on Traffic Accidents in Sweden. Communication à **International Symposium. The Effects of Speed Limits on Traffic Accidents and Transport Energy Use**. Road Research Programme of the Organisation for Economic CoOperation and Development (OECD), Dublin, October, 9 p.

ONSIR (ORGANISME NATIONAL DE SECURITE ROUTIERE) (1969) Réglementation de la vitesse. **ONSER Documents**, n° 2.

ONSIR (OBSERVATOIRE NATIONAL INTERMINISTERIEL DE SECURITE ROUTIERE) (1999) **Bilan annuel : statistiques et commentaires année 1998**.

ONSIR (OBSERVATOIRE NATIONAL INTERMINISTERIEL DE SECURITE ROUTIERE) (2003) **Bilan annuel : statistiques et commentaires année 2002**.

ONSIR/SETRA (OBSERVATOIRE NATIONAL INTERMINISTERIEL DE SECURITE ROUTIERE/SERVICE D'ETUDES DES ROUTES ET AUTOURUTES) (1999) **Accidents corporels de la circulation routière 1998**. SETRA Diffusion (document de travail).

U.R.F. (UNION ROUTIERE de FRANCE) (2002) **Faits et Chiffres, Statistiques du transport en France**.

RIETVELD P., RIENSTRA S.A., PEETERS P.M., van ASSELDONK Y., van BINSBERGEN A.J., SCHOEMAKER Th.J.H., van GOERVERDEN C.D., VERMIJS R.G.M.M. (1996) **Time to Tame our Speed? A Study of the Socio-economic Cost and Benefits of Speed Reduction of Passenger Cars**. Den Haag, Report to Research Unit for Integrated Transport Studies.

SALUSJÄRVI M. (1981) The Goals of Speed Limits. Communication au **International Symposium. The Effects of Speed Limits on Traffic Accidents and Transport Energy Use**. Road Research Programme of the Organisation for Economic CoOperation and Development (OECD), Dublin, October, 9 p.

SOULAGE D. (1994) Méthode Franco-Allemande de caractérisation des qualités acoustiques des revêtements de chaussées. **Mesure des bruits routiers et ferroviaires**, INRETS (Coll. Actes INRETS n° 36).

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (1998) Managing Speed Review of Current Practice for Setting and Enforcing Speed Limits. **Special Report 254**, National Research Council.

VARIAN A. (2000 (1987)) **Introduction à la microéconomie**. De Boeck, Prémisses, Ouvertures Economiques (4^{ème} édition).

ANNEXES

ANNEXE I

1. Les véhicules essence

La formule (a) reliant l'émission de monoxyde d'azote (E_{no}) et la vitesse de circulation (V) est estimée pour un intervalle de vitesse entre 10 et 130 km/h.

$$E_{no}=0,526-0,0085\times V+8,54\times 10^{-5}\times V^2 \quad (a)$$

La fonction de coût total (b) pour l'émission d'azote, pour les véhicules « essence » est obtenue par le produit de la fonction (a) par 4 euros par kilogramme.

$$CT_{E_{no}}=0,233-3,76\times 10^{-3}\times V+3,78\times 10^{-5}\times V^2 \quad (b)$$

En dérivant la fonction $CT_{E_{no}}$ par rapport à la vitesse (V), nous obtenons le coût marginal de l'émission de monoxyde d'azote :

$$\frac{\partial CT_{E_{no}}}{\partial V}=Cm_{E_{no}}=-3,76\times 10^{-3}+7,56\times 10^{-5}\times V \quad (c)$$

En pondérant, les fonctions de coût total et marginal respectivement par 0,32 et 0,68³², nous obtenons les fonctions de coût total et marginal pour les véhicules essence pour les routes nationales et départementales.

Une même démarche est appliquée pour les émissions d'hydrocarbures et dioxyde de carbone. La fonction (d) désigne l'émission d'hydrocarbures. Le produit de la fonction (d) par le prix de la pollution (4 euros par kilogramme émis) détermine la fonction de coût des émissions polluantes. La dérivée première de (e) par rapport à la vitesse de circulation (V) permet de déterminer le coût marginal (f).

$$E_{hc}=0,4494-0,0088\times V+5,21\times 10^{-5}\times V^2 \quad (d)$$

$$CT_{E_{hc}}=0,199-3,889\times 10^{-3}\times V+2,303\times 10^{-5}\times V^2 \quad (e)$$

$$\frac{\partial CT_{E_{hc}}}{\partial V}=-3,889\times 10^{-3}+4,615\times 10^{-5}\times V \quad (f)$$

³² Poids respectif dans le kilométrage total.

Une démarche similaire est employée pour déterminer le coût total et le coût marginal des émissions polluantes de dioxyde de carbone à l'aide des fonctions (g), (h) et (i)³³.

$$E_{co2}=231-3,62\times V+0,0263\times V^2+\frac{256}{V} \quad (g)$$

$$CT_{Eco2}=1,278-0,02\times V+1,456\times 10^{-4}\times V^2+\frac{14,17}{V} \quad (h)$$

$$\frac{\partial CT_{Eco2}}{\partial V}=Cm_{co2}=-0,02+2,912\times 10^{-4}\times V-\frac{14,17}{V^2} \quad (i)$$

2. Les véhicules diesel

La démarche utilisée pour déterminer le coût des différentes émissions polluantes pour les véhicules diesel est similaire à celle pour les véhicules à essence. Le produit de la formule d'émission par le coût associé permet de déterminer la fonction de coût total. La dérivée première par rapport à la vitesse de circulation du véhicule (V) désigne la fonction de coût marginal. Les valeurs des coûts unitaires par kilogramme associés aux différentes pollutions sont identiques à celles retenues pour les véhicules à essence. Seules les fonctions d'émission diffèrent donc.

La fonction d'émissions de monoxyde d'azote est définie par (j), la fonction de coût total par (k) et la fonction de coût marginal par (l).

$$E_{no}=0,918-0,014\times V+1,01\times 10^{-3}\times V^2 \quad (j)$$

$$CT_{no}=0,332-5,07\times 10^{-3}\times V+3,66\times 10^{-5}\times V^2 \quad (k)$$

$$\frac{\partial CT_{no}}{\partial V}=Cm_{no}=-5,07\times 10^{-3}+7,32\times 10^{-5}\times V \quad (l)$$

Pour les émissions d'hydrocarbures, les fonctions respectives d'émission, de coût total et de coût marginal sont données par (m), (n) et (o).

$$E_{hc}=4,61\times V^{-0,937} \quad (m)$$

$$CT_{hc}=1,67\times V^{-0,937} \quad (n)$$

$$\frac{\partial CT_{hc}}{\partial V}=Cm_{hc}=-1,565\times V^{-1,937} \quad (o)$$

Pour les émissions de dioxyde de carbone, les fonctions sont (p), (q) et (r).

$$E_{co2}=374-6,58\times V+0,0442\times V^2-\frac{30,3}{V} \quad (p)$$

$$CT_{co2}=1,69-0,029\times V+2,0\times 10^{-4}\times V^2-\frac{0,137}{V} \quad (q)$$

$$\frac{\partial CT_{co2}}{\partial V}=-0,029+4,0\times 10^{-4}\times V+\frac{0,137}{V^2} \quad (r)$$

³³ Le coût de la pollution par kilogramme de dioxyde de carbone est de 0,05 euros.

ANNEXE 2

Les formules de consommation³⁴ pour les véhicules essence (s) et diesel (t) peuvent être exprimées comme suit.

Véhicules à essence (en litres pour 100 km) :

$$C_e = 0,154 \times (0,866 \times HC + 0,429 \times CO + 0,273 \times CO_2) \quad (s)$$

Véhicules diesel (en litres pour 100 km) :

$$C_d = 0,135 \times (0,866 \times HC + 0,429 \times CO + 0,273 \times CO_2) \quad (t)$$

où (HC), (CO) et (CO₂) désignent les émissions respectives d'hydrocarbures, d'oxyde de carbone et dioxyde de carbone, qui dépendent de la vitesse de circulation. A l'aide des formules d'émission (Annexe 1), il est donc possible de déterminer une relation entre la consommation de carburant et la vitesse de circulation. Ces formules constituent une approximation pour l'ensemble du parc, compte tenu du fait que la consommation dépend aussi de l'intensité d'utilisation du véhicule, du nombre d'accélération et de la distance moyenne parcourue...

Pour déterminer la formule de consommation des différents types de véhicules, il convient alors d'utiliser les formules d'émission précédemment définies et de préciser celle pour l'émission de CO.

Pour les véhicules essence, nous retiendrons :

$$E_{co} = 9,617 - 0,254 \times V + 0,001 \times V^2 \quad (u)$$

Pour les véhicules diesel, nous appliquerons :

$$E_{co} = 5,413 \times V^{-0,574} \quad (v)$$

En intégrant le kilométrage effectué et le prix du carburant, les fonctions de coût total (w) et (y) et de coût marginal (x) et (z)³⁵ pour chaque type de véhicule peuvent être calculées. La somme des deux permet de déterminer la fonction de coût total et de coût marginal des dépenses de carburant en fonction de la vitesse.

$$C_{te} = 2,06 - 0,033 \times V + 2,33 \times 10^{-4} \times V^2 + \frac{2,14}{V} \quad (w)$$

$$C_{me} = -0,033 + 4,66 \times 10^{-4} \times V^2 - \frac{2,14}{V^2} \quad (x)$$

$$C_{td} = 3,05 + 0,12 \times V^{-0,937} + 0,07 \times V^{-0,574} + 0,05 \times V + 3,60 \times 10^{-4} \times V^2 - \frac{0,24}{V} \quad (y)$$

$$C_{md} = 0,05 - 0,08 \times V^{-0,937} - 0,04 \times V^{-1,574} + 7,2 \times 10^{-4} \times V + \frac{0,24}{V^2} \quad (z)$$

³⁴ Je dois à Michel ANDRÉ les formules de consommation pour les véhicules essence et diesel. Il s'agit de formules pour les véhicules de type essence de la classe EURO 1 avec une cylindrée comprise entre 1,4 et 2 litres et pour un éventail de vitesse compris entre 10 et 130 km/h. Pour les véhicules diesel, il s'agit des véhicules toutes catégories pour un éventail de vitesse similaire.

³⁵ Les indices (e) et (d) renvoient respectivement au véhicule type essence et diesel.