

CONSTRUIRE
DE NOUVELLES INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES

La solution
à la congestion du trafic ?



CIM*béton*

CENTRE D'INFORMATION SUR
LE CIMENT ET SES APPLICATIONS



CONSTRUIRE

DE NOUVELLES INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES

La solution
à la congestion du trafic ?

Ce document a été rédigé par **Joseph ABDO**, directeur délégué Routes **Cimbéton**.

Avant-propos

● **Pour résorber la congestion routière, faut-il augmenter la capacité des infrastructures routières ?**

Tout le monde s'accorde aujourd'hui à dire que les systèmes de transport vont devoir relever un défi majeur au cours des prochaines décennies pour assurer durablement la mobilité et les déplacements des personnes. En effet, si la moitié de la population mondiale (7 milliards) habite désormais en ville, les prévisions annoncent qu'en 2050 plus des 2/3 de la population mondiale (9 milliards) résideront en ville. Il est donc impératif aujourd'hui que les infrastructures de transport **prennent définitivement le virage de la construction durable et soient moins coûteuses en énergie et moins polluantes.**

Pour y parvenir, les avis divergent et on peut, sans trop de difficultés, affirmer qu'il existe au moins deux lignes de pensée.

La première ligne de pensée affirme que la route est une source importante de nuisances et, en particulier, d'impacts sur l'environnement : il convient, dès lors, de freiner l'expansion du réseau routier au profit d'autres modes de transport. Une solution intéressante, mais à courte vue car statique et de surcroît dangereuse : elle engendre en effet, eu égard à l'image négative de la route qu'elle véhicule, une sorte d'abandon du patrimoine routier.

La deuxième ligne de pensée affirme que la route est indispensable dans tout système de transport fiable et efficace. Elle se propose de trouver la **meilleure stratégie** pour rendre le schéma organisationnel de toutes les infrastructures de transport **fiable, souple et optimisé.** Une solution rationnelle et dynamique, mais nécessitant une planification claire, des moyens importants et une rigueur sans faille.

Mais, quelle que soit la ligne de pensée qui sera finalement adoptée, une question demeure posée : **comment résoudre le problème de la congestion du trafic routier ?**

Adopter une politique conforme à la première ligne de pensée ne peut au mieux que maintenir l'état de congestion. Pire, elle peut entraîner son aggravation, surtout quand on prend en compte les prévisions en matière d'évolution de la démographie et de l'étalement urbain. Une politique à l'encontre de l'expansion du réseau routier pourrait entraîner des coûts plus importants qu'une politique prônant de construire intelligemment de nouvelles routes pour délester le trafic.

Le dossier présenté ci-après souligne l'état alarmant de la congestion du réseau routier et quantifie le coût économique, sociétal et environnemental qu'un tel état engendre.

Aussi surprenant que cela puisse paraître, les calculs montrent que - pour décongestionner les routes tout en faisant faire des économies à la communauté, en réduisant en même temps la gêne aux usagers et aux riverains, ainsi qu'en minimisant les impacts sur l'environnement - la solution passe par la construction de nouvelles infrastructures routières.

Car, finalement, quand on y réfléchit bien, ce n'est pas la construction des infrastructures routières qui impacte le plus, mais plutôt l'utilisation de celles-ci.

Joseph ABDO
Directeur délégué Routes - Cimbéton

Sommaire

I - La congestion du trafic routier est-elle une fatalité ?	9
1.1 - Pourquoi y a-t-il des bouchons sur les routes ?	11
1.2 - Conséquences de la congestion du trafic routier	11
1.2.1 - Conséquences économiques	11
1.2.2 - Conséquences sociétales	12
1.2.3 - Conséquences environnementales	12
1.3 - Perspectives d'évolution de la congestion des routes	12
1.4 - Y a-t-il des remèdes contre la congestion du trafic routier ?	13
1.5 - Les mathématiques à notre rescousse	14
1.5.1 - Cas d'un monde idéalisé	14
1.5.2 - Cas d'un monde semi-idéalisé	16
1.5.3 - Cas d'un monde semi-réaliste	17
1.6 - Conclusion	20

2 - D'un point de vue économique et sociétal, faut-il augmenter la capacité des infrastructures routières ?	21
2.1 - Le bilan économique et sociétal	23
2.1.1 - Le bilan économique	23
2.1.1.1 - Le coût d'investissement global de l'infrastructure routière	23
2.1.1.2 - Les économies réalisées par les usagers	25
2.1.2 - Le bilan sociétal	26
2.1.2.1 - Les gênes causées aux usagers et aux riverains <i>durant les phases construction et entretien de l'infrastructure routière</i>	26
2.1.2.2 - Le confort des usagers et des riverains, et le gain de temps des usagers, <i>du fait de la fluidification du trafic</i>	26
2.2 - Évaluation du bilan économique et sociétal	26
2.2.1 - Les hypothèses de calcul	26
2.2.1.1 - Caractéristiques géométriques	26
2.2.1.2 - Structures prises en compte	27
2.2.1.3 - Les séquences d'entretien	27
2.2.2 - Les données de l'étude	28
2.2.2.1 - Données relatives aux coûts de construction et d'entretien de chaussées	28
2.2.2.2 - Données relatives à la circulation routière	28
2.2.2.3 - Données économiques	28
2.2.3 - Evaluation du bilan économique	29
2.2.4 - Evaluation du bilan sociétal	32
2.3 - Conclusion	34

3 - D'un point de vue environnemental, faut-il augmenter la capacité des infrastructures routières ?	35
3.1 - Le bilan environnemental	37
3.1.1 - L'impact global généré par une nouvelle infrastructure routière	37
3.1.1.1 - Expression des impacts générés par la phase construction : I_c	37
3.1.1.2 - Expression des impacts générés par les entretiens de la route : I_e	38
3.1.1.3 - Expression des impacts dus à la surconsommation des véhicules, générés par la congestion du trafic causée par les travaux de construction et d'entretien : I_s	38
3.1.2 - Les impacts dus à la surconsommation de carburant (véhicules légers et poids lourds)	38
3.2 – Évaluation du bilan environnemental	39
3.2.1 - Les hypothèses de calcul	39
3.2.1.1 - Les données géométriques, structurelles et les scénarios d'entretien	39
3.2.1.2 - Le recyclage en fin de vie	39
3.2.2 - Les données environnementales de l'étude	40
3.2.2.1 - Les inventaires de fabrication des constituants de base	40
3.2.2.2 - Les inventaires de fabrication des mélanges	40
3.2.2.3 - Les inventaires de transport des constituants et des mélanges	41
3.2.2.4 - Les inventaires de mise en œuvre	42
3.2.2.5 - Les inventaires de la construction	43
3.2.3 - Évaluation du bilan environnemental	43
3.2.4 - Les enjeux de ce bilan environnemental	47
3.2.5 - Facteurs favorables au béton, non pris en compte dans le bilan	47
3.3 – Conclusion	49

La congestion du trafic routier est-elle une fatalité ?

1.1 - Pourquoi y a-t-il des bouchons sur les routes ?

1.2 - Conséquences de la congestion du trafic routier

1.2.1 - Conséquences économiques

1.2.2 - Conséquences sociétales

1.2.3 - Conséquences environnementales

1.3 - Perspectives d'évolution de la congestion des routes

1.4 - Y a-t-il des remèdes contre la congestion du trafic routier ?

1.5 - Les mathématiques à notre rescousse

1.5.1 - Cas d'un monde idéalisé

1.5.2 - Cas d'un monde semi-idéalisé

1.5.3 - Cas d'un monde semi-réaliste

1.6 - Conclusion



Malgré les progrès techniques et technologiques accomplis par l'homme dans tous les domaines de la connaissance, le trafic routier reste victime d'une congestion sans cesse croissante.

Il sera sans doute bientôt possible de voyager jusqu'à la planète Mars, mais la congestion continue à demeurer un véritable casse-tête pour les gestionnaires routiers de tous les pays.

La congestion d'un réseau routier est la condition dans laquelle une augmentation du trafic de véhicules provoque un ralentissement global de celui-ci. Le terme de congestion désigne la dégradation de la qualité de service quand le nombre d'utilisateurs augmente. Ce phénomène se caractérise par l'apparition de retards, voire de goulets d'étranglement en période de fort trafic, c'est-à-dire quand la capacité de l'infrastructure devient insuffisante pour réguler les flux.

Le problème est fréquent localement et périodiquement, notamment dans les grandes villes et lors des grands départs pour les vacances.

Dans quelle ampleur la congestion est-elle présente ? Quel est le coût pour la société ? Comment y remédier ?

Le but de ce chapitre est de répondre à ces questions essentielles. Il y sera présenté successivement les causes de la congestion du trafic routier, les enjeux économiques, sociaux et environnementaux, les solutions proposées pour fluidifier le trafic et enfin les actions à entreprendre pour influencer les comportements des automobilistes.

1.1 - Pourquoi y a-t-il des bouchons sur les routes ?

Pour comprendre la congestion du trafic routier, il faut garder présent à l'esprit que c'est un phénomène qui survient lorsque la demande (le nombre de véhicules qui cherchent à utiliser une infrastructure donnée) est supérieure à la capacité de cette infrastructure. Si la demande excède la capacité, alors des véhicules seront ralentis à l'entrée de l'infrastructure, formant ainsi un bouchon. Ces véhicules excédentaires seront à chaque instant plus nombreux qu'à l'instant précédent. Comme chaque véhicule occupe une certaine longueur de voie, la longueur de la file d'attente ne fera que croître en proportion du nombre de véhicules présents dans cette file d'attente. On voit de ce qui précède que la congestion est un phénomène évolutif, à la fois dans le temps et dans l'espace.

Or, en raison du caractère maillé de l'infrastructure, cet allongement de la file d'attente peut la conduire à atteindre des points de choix d'itinéraire, et ainsi congestionner des parties du réseau où circulent des véhicules qui n'utiliseront pas l'infrastructure à l'origine de la congestion.

La première cause est tout simplement un volume de circulation supérieur à la capacité routière : les voitures sont trop nombreuses et le trafic s'arrête à chaque goulot d'étranglement (rétrécissement de la route, voies qui se rejoignent, croisements de routes). La circulation est à ce titre comparable à l'écoulement d'un liquide dans un tuyau.

En outre, le contexte de la mondialisation économique a largement contribué à l'augmentation des besoins en circulation des biens et des personnes. Cet accroissement en mobilité constitue une des causes principales d'apparition de plus en plus fréquente du phénomène de congestion.

La seconde cause est liée aux comportements des conducteurs. Quand les voitures sont proches les unes des autres, il suffit qu'un conducteur freine brutalement pour faire freiner en cascade tous les véhicules qui le suivent et propager ainsi un ralentissement, voire même un arrêt du trafic sur une certaine longueur. Quand le premier conducteur redémarre, de nouvelles voitures sont venues s'agglutiner et le bouchon se déplace vers l'arrière comme une onde, par un effet de dominos.

En outre, plusieurs événements peuvent provoquer ou aggraver la congestion : accidents, travaux, voitures en panne, stationnements gênants, conditions météorologiques mauvaises, etc.

1.2 - Conséquences de la congestion du trafic routier

Elles sont nombreuses et peuvent être classées en trois catégories : économiques, sociétales et environnementales.

■ 1.2.1 - Conséquences économiques

D'un point de vue économique, la congestion du trafic routier entraîne :

- **Une perte de compétitivité d'une région**, d'un pays ou d'un continent, du fait des congestions qui bloquent les artères de communication routière,
- **Une perte de productivité**, non seulement à cause des retards des personnes se rendant sur les lieux de leur travail, mais aussi en raison des livraisons tardives des approvisionnements ou des services rendus avec des retards importants voire annulés.

Le saviez-vous ?

Des études réalisées par l'Union européenne chiffrent le coût de la congestion routière (imputable tant aux migrations alternantes et au trafic de loisir qu'aux déplacements d'affaires et au transport de marchandises) à 1% en moyenne du PIB de ses États membres, et plus exactement à 1,5% pour le Royaume-Uni et la France, et 0,9% pour l'Allemagne et les Pays-Bas.

■ 1.2.2 - Conséquences sociétales

Les usagers de la route se plaignent amèrement des heures qu'ils perdent dans les embouteillages (plus de 1 milliard d'heures par an pour la France) parce qu'elles empiètent sur le temps qu'ils peuvent consacrer à leur travail et à leur famille. La congestion du trafic routier aura deux impacts importants sur :

- **La qualité de vie des usagers**, car les conducteurs soumis à des embouteillages fréquents sont sujet à des problèmes de stress, d'anxiété et d'énervement, entraînant un accroissement du risque d'accident,
- **Le pouvoir d'achat des usagers**, car la congestion du trafic a des conséquences directes sur l'augmentation de la consommation énergétique. Dans le contexte actuel d'envolée des prix du pétrole, ceci engendre une nette diminution du pouvoir d'achat des usagers.

■ 1.2.3 - Conséquences environnementales

Enfin, d'un point de vue environnemental, la congestion du trafic routier a un impact néfaste et négatif à cause de l'augmentation de la pollution qui engendre des coûts économiques et écologiques en croissance exponentielle.

L'érosion de la productivité causée par les pertes de temps dues aux bouchons, l'aggravation de la pollution de l'air et de l'eau, l'augmentation du bruit et la dégradation de la qualité de vie sont autant de conséquences de l'augmentation de la demande de transport terrestre.

On peut donc conclure que le phénomène de congestion du trafic routier est un problème socio-économico-environnemental crucial qui exige de rechercher des solutions efficaces et rapides.

1.3 - Perspectives d'évolution de la congestion des routes

La France s'est appliquée récemment, dans le cadre de la réalisation de son plan de transport à l'horizon 2050, à définir le sens dans lequel la congestion de ses réseaux nationaux de transport allait évoluer. Il semble qu'elle doive s'attendre à une multiplication des goulets d'étranglement routiers.

Globalement, la situation va s'aggraver. Le trafic routier continuera à augmenter alors que la capacité du réseau ne s'accroîtra pas au même rythme.

Ces perspectives d'évolution requièrent non seulement une meilleure coordination de l'utilisation des sols, de l'urbanisme et de la planification des transports, mais aussi des avancées technologiques et une modification du style de vie.

L'aspiration à la création d'un système de transport routier équilibré et écologiquement viable incitera les gestionnaires à identifier les stratégies et les mesures à suivre pour influencer sur la demande de mobilité de demain, pour améliorer les conditions de circulation et pour rationaliser l'utilisation des infrastructures routières.

Le saviez-vous ?

- Selon certains chiffres officiels, la moitié du carburant utilisé aujourd'hui dans l'UE est gaspillé dans les embouteillages, en raison d'infrastructures inadéquates et de goulets d'étranglement.
- Les chiffres aux Etats-Unis font état d'une situation similaire. En 2004 aux Etats-Unis, la congestion est à l'origine du gaspillage de 100 milliards de litres de carburant, soit 250 millions de tonnes de CO₂ émises dans l'environnement !
- Pourtant, le manque d'espace est l'excuse la plus couramment invoquée pour ne pas construire de nouvelles infrastructures. Mais, en moyenne, les infrastructures routières recouvrent moins de 0,5 % de la plupart des territoires nationaux !



1.4 - Y a-t-il des remèdes contre la congestion du trafic routier ?

Un premier remède pour décongestionner le trafic est d'augmenter la capacité du réseau routier. Une solution, certes coûteuse, mais qui présente l'énorme avantage de fluidifier de façon durable le trafic, engendrant ainsi des économies en matière de consommation de carburant et une forte réduction des impacts sur l'environnement. Cette solution n'est malheureusement pas d'actualité au niveau des Pouvoirs publics qui privilégient plutôt le développement des modes de transport alternatifs à la route.

À défaut d'augmenter la capacité d'accueil des routes, une autre solution serait de mettre au point des outils pour la régulation et la gestion du trafic routier.

En effet, le trafic routier est un phénomène complexe d'une part en raison du nombre élevé d'acteurs qui y participent, d'autre part à cause du caractère très maillé du réseau sur lequel il se déroule. Depuis une cinquantaine d'années, cependant, des théoriciens du trafic cherchent à comprendre le phénomène de congestion du trafic, à quantifier les mécanismes à l'œuvre et à mettre au point des outils basés sur la modélisation. Il s'agit de modéliser l'évolution de la densité de voitures dans le temps et l'espace. Et pour établir ces modèles, certains chercheurs utilisent les équations aux dérivées partielles, des équations qui permettent de décrire des phénomènes physiques comme la dynamique des gaz ou l'écoulement de fluides.

Malgré tous les efforts consentis en matière de recherche et de développement qui se sont traduits par la mise au point d'innombrables outils pour la régulation et la gestion du trafic routier, force est de constater que le problème de la congestion du trafic n'est pas pour autant résolu.

Que nous reste-t-il alors comme possibilités pour gérer au mieux le problème de la congestion du trafic routier ?

Pour ma part, je pense que la solution n'est pas uniquement d'ordre technologique, mais aussi et surtout d'ordre humain. Il est enfin temps de se préoccuper de l'éducation, de la sensibilisation et de la formation des conducteurs pour qu'ils deviennent les vrais acteurs d'une meilleure fluidification du trafic routier.

Pour cela, il est nécessaire d'analyser rationnellement le phénomène de congestion du trafic routier, d'identifier les causes conduisant aux différents changements dans les conditions de circulation et d'élaborer des recommandations qui, appliquées au niveau de chaque conducteur, conduiront sûrement à améliorer les conditions de circulation.

Les recommandations sont simples et relèvent du bon sens. Elles sont le résultat d'une analyse fine et d'un modèle mathématique simplifié et idéalisé.

1.5 - Les mathématiques à notre rescousse

La mission d'une route est de faire passer un maximum de voitures en un minimum de temps et ceci sur chaque tronçon du parcours. Cela revient à dire que la route doit assurer un débit maximal. Quelles sont alors les conditions qui autorisent ce débit maximal ?

■ 1.5.1 - Cas d'un monde idéalisé

Considérons une piste d'essais ayant une seule voie de circulation et comprenant un tronçon rectiligne suffisamment long. Traçons, sur un des bords de la partie rectiligne, une ligne transversale à la piste qui matérialise la ligne de départ. Disposons sur ce tronçon rectiligne un nombre N de voitures identiques de longueur L et dont les conducteurs sont supposés être des robots parfaitement synchronisés. Ces voitures sont supposées être identiques sur tous les plans et disposer d'un système de freinage à effet immédiat et instantané qui arrête le véhicule net quelle que soit sa vitesse. La première voiture est positionnée de telle manière que son pare-choc avant soit à l'aplomb de la ligne de départ. Positionnons ensuite les $N-1$ voitures restantes, les unes derrière les autres, pare-choc contre pare-choc (voir figure 1).

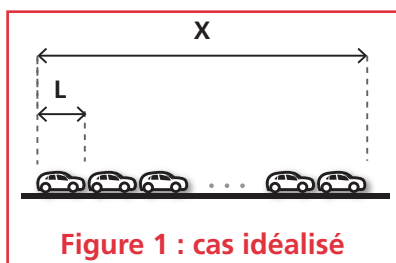


Figure 1 : cas idéalisé

Dans ce cas idéalisé, un calcul simple nous permet de déterminer le nombre de voitures N qui couvrent une longueur donnée X de la piste : $N = X/L$

Donnons maintenant le départ et demandons aux conducteurs (robots) de monter en vitesse progressivement pour atteindre, après un tour complet (retour à la position origine) la vitesse V et la maintenir constante. Toutes les voitures se mettent en même temps, en mouvement puisque les conducteurs sont parfaitement synchronisés.

Compte tenu de la synchronisation parfaite des conducteurs et de l'effet instantané des freins, ces véhicules peuvent rouler à vitesse constante V sur la piste tout en maintenant la position serrée "pare-choc contre pare-choc". Le nombre de véhicules, dans ce cas de figure, qui traverse la ligne de départ pendant le temps T , peut être calculé par la formule :

$$N = X/L \text{ et } V = X/T$$

Donc :

$$N = VT/L \quad (1)$$

Déterminons alors l'expression du débit de la piste sur la partie rectiligne.

La physique nous apprend que le débit Q est la quantité de matière M qui franchit à vitesse constante V une section fictive pendant une unité de temps T . Adapté à notre exemple, le débit Q d'un tronçon de piste est alors le nombre de véhicules N qui franchit à vitesse constante V la ligne de départ par unité de temps T . L'expression mathématique du débit de la piste devient :

$$Q \text{ (véhicules par heure)} = N \text{ (véhicules)}/T \text{ (heure)} \quad (2)$$

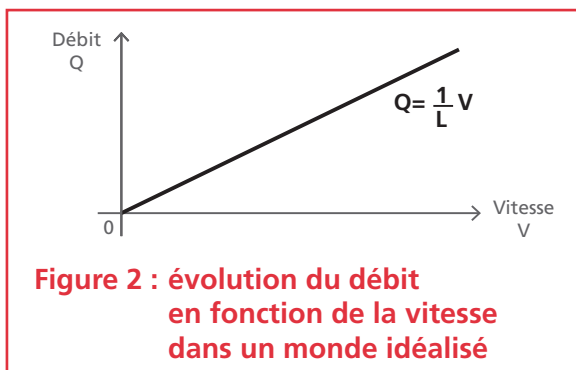
Les relations (1) et (2) permettent alors de déterminer l'expression du débit d'un tronçon rectiligne d'une route dans le cadre idéalisé défini ci-dessus.

$$Q = V/L \quad (3)$$

où Q : nombre de véhicules par heure, V : vitesse en m/s et L : longueur de la voiture en mètres.

Dans ce cas idéalisé, on s'aperçoit que le débit d'une route est proportionnel à la vitesse des véhicules (la longueur L des véhicules étant constante). Plus la vitesse est élevée, plus le débit est fort (voir figure 2).

Dans un monde idéalisé, tel que défini ci-dessus, le trafic routier ne connaîtra jamais d'embouteillage. Pour augmenter le débit d'une route, il suffit de demander aux véhicules de rouler plus vite pare-chocs contre pare-chocs. En effet, le débit varie en fonction de la vitesse selon une droite passant par l'origine et dont la pente est égale à $1/L$.



Ceci suppose des conducteurs ayant un comportement identique (temps de réaction identique et synchronisation parfaite) et des véhicules en tout point identiques, disposant d'un freinage instantané. Si la piste comprend d'autres voies de circulation, la méthode s'applique et le raisonnement est similaire, à condition que les conducteurs ne changent pas de voie.

Bien évidemment, ceci n'est pas vrai dans notre monde réel, mais beaucoup de gens le croient !

Mais, le monde n'est pas si parfait !

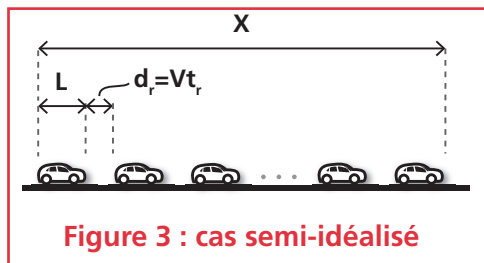
Dans le monde réel, les conducteurs sont si différents, de par leur état, leur comportement et leur attitude, que l'on est tenté de considérer que chaque conducteur est unique. Aussi, le même constat s'applique aux véhicules qui diffèrent par leurs âges, leurs dimensions, leurs poids, leurs états mécaniques et en particulier leurs systèmes de freinage. Dans ce monde réel, le phénomène de congestion du trafic routier acquiert donc le statut d'un système complexe, compte tenu du nombre élevé de paramètres qu'il faut prendre en compte. Mais, la démarche demeure la même, et en particulier pour la détermination de l'expression du débit d'une route.

Allons donc, pas à pas, vers le monde réel !

■ 1.5.2 - Cas d'un monde semi-idéalisé

Tout en maintenant l'hypothèse de véhicules idéalisés (même âge, même dimension, même poids, même système de freinage, etc.), considérons que les conducteurs sont réellement des humains avec tout ce que cette notion englobe comme différences.

Reprenons notre expérience sur la piste d'essais. Compte tenu des différences qui existent entre les différents conducteurs (temps de réaction en particulier), il a été demandé, cette fois, à chaque conducteur d'observer une distance de sécurité par rapport au véhicule qui le précède et qui correspond à la distance "d_r" qu'aurait parcouru le véhicule durant le temps de réaction moyen t_r des conducteurs (voir figure 3).



Dans ce cas semi-idéalisé, un calcul simple nous permet de déterminer le nombre de voitures N qui couvrent une longueur donnée X de la piste :

$$N = X / (L + d_r) \text{ avec : } d_r = V t_r$$

D'où :

$$N = X / (L + V t_r) \quad (4)$$

Donnons maintenant le départ et demandons aux conducteurs de monter en vitesse progressivement pour atteindre, après un tour complet (retour à la position origine) la vitesse V et la maintenir constante. Toutes les voitures se mettent en mouvement avec décalages puisque les conducteurs ne sont plus synchronisés. Compte tenu de l'effet instantané des freins, ces véhicules peuvent rouler à vitesse constante V sur la piste mais en maintenant une distance de sécurité "d_r". Le nombre de véhicules, dans ce cas de figure, qui traverse la ligne de départ pendant le temps T, peut être calculé par la formule :

$$N = X / (L + d_r) \text{ avec } d_r = V t_r \text{ et } V = X/T$$

D'où :

$$N = VT / (L + V t_r) \quad (5)$$

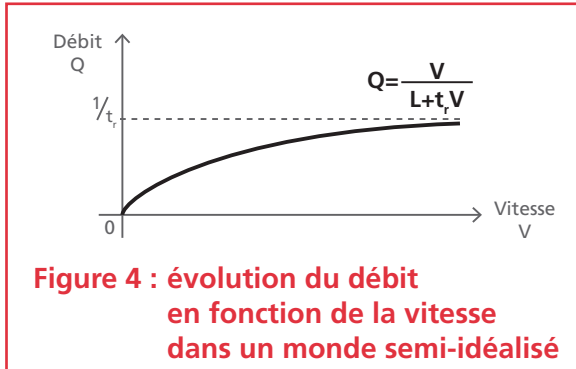
Les relations (5) et (2) permettent alors de déterminer l'expression du débit d'un tronçon rectiligne d'une route dans le cadre semi-idéalisé défini ci-dessus.

$$Q = VT / (L + V t_r) T$$

$$Q = V / (L + V t_r) \quad (6)$$

Dans ce cas semi-idéalisé, on s'aperçoit que le débit d'une route, en situation de saturation de trafic, varie en fonction de la vitesse V, selon une fonction hyperbolique. Pour une longueur de véhicule et un temps de réaction donnés, lorsque la vitesse augmente, le débit tend à converger vers une valeur

constante et égale à $1/t_r$. Aux conditions limites, plus le temps de réaction t_r est élevé, plus le débit est faible. Inversement, plus le temps de réaction t_r est faible, plus le débit est fort (voir figure 4).



Dans un monde semi-idéalisé, le débit d'une route en situation de saturation de trafic est une fonction hyperbolique de la vitesse. Le débit augmente avec la vitesse pour atteindre une valeur limite égale à $1/t_r$. A sa valeur limite, le débit dépendra spécifiquement du temps de réaction moyen des conducteurs.

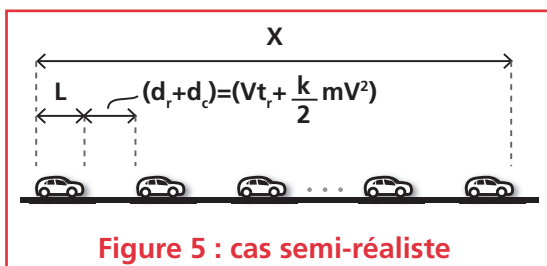
Si la piste comprend d'autres voies de circulation, la méthode s'applique et le raisonnement est similaire, à condition que les conducteurs ne changent pas de voie.

Encore une fois, les mathématiques nous montrent que pour contribuer à la décongestion des routes, rien ne sert de courir. En effet, au-delà d'une certaine vitesse, le débit n'augmente presque plus.

■ 1.5.3 - Cas d'un monde semi-réaliste

Reprenons notre expérience sur la piste d'essais.

En plus des différences qui existent entre les différents conducteurs (temps de réaction en particulier), nous supposons que les voitures ne disposent pas d'un système de freinage à effet immédiat ou instantané. Pour s'immobiliser sous l'effet du freinage, la voiture aura besoin d'une certaine distance pour dissiper l'énergie cinétique qu'elle a emmagasinée. En d'autres termes, les freins ont besoin d'une distance moyenne d_c proportionnelle à l'énergie cinétique ($d_c = kmV^2/2$) pour arrêter les véhicules. Il a été demandé, Cette fois, à chaque conducteur d'observer une distance de sécurité par rapport au véhicule qui le précède et qui correspond à la distance " $d = d_r + d_c$ " qu'aurait parcouru le véhicule durant le temps moyen " $t = t_r + t_c$ " (voir figure 5).



Dans ce cas semi-réaliste, un calcul simple nous permet de déterminer le nombre de voitures N qui couvrent une longueur donnée X de la piste :

$$N = X / (L+d) = X / (L+ d_r + d_c)$$

$$\text{Avec : } d_r = V t_r \text{ et } d_c = kmV^2/2$$

D'où :

$$N = X / (L+V t_r + kmV^2/2) \quad (7)$$

Donnons maintenant le départ et demandons aux conducteurs de monter en vitesse progressivement pour atteindre, après un tour complet (retour à la position origine) la vitesse V et la maintenir constante. Toutes les voitures se mettent en mouvement avec décalages puisque les conducteurs ne sont plus synchronisés. Compte tenu de l'effet différé des freins, ces véhicules peuvent rouler à vitesse constante V sur la piste, mais en maintenant une distance de sécurité " d ". Le nombre de véhicules, dans ce cas de figure, qui traverse la ligne de départ pendant le temps

T, peut être calculé par la formule :

$$N = X / (L+d)$$

avec $d = d_r + d_c = V t_r + kmV^2/2$ et $V = X/T$

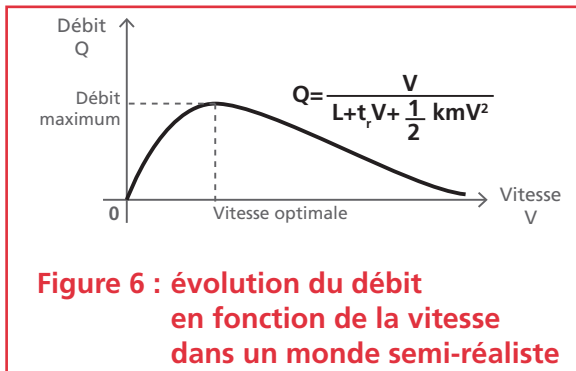
D'où :

$$N = VT / (L+V t_r + kmV^2/2) \quad (8)$$

Les relations (8) et (2) permettent alors de déterminer l'expression du débit d'un tronçon rectiligne d'une route dans le cadre semi-réaliste défini ci-dessus.

ou $Q = VT/(L+V t_r + kmV^2/2)T$

$$Q = V/(L+V t_r + kmV^2/2) \quad (9)$$



Dans ce cas semi-réaliste, on s'aperçoit que le débit d'une route, en situation de saturation de trafic, varie en fonction de la vitesse V, selon une fonction hyperbolique. Pour une longueur de véhicule et un temps de réaction donnés, lorsque la vitesse augmente, le débit augmente jusqu'à atteindre un maximum puis il diminue pour tendre vers une valeur nulle lorsque la vitesse tend vers l'infini (voir figure 6).

Pour une longueur de véhicule et un temps de réaction donnés, le meilleur débit est obtenu lorsque la condition suivante est atteinte :

$$dQ/dV = 0$$

ou $V_{opt} = \sqrt{\frac{2L}{km}} \quad (10)$

$$Q_{max} = a / (b + at_r) \text{ avec } a = \sqrt{\frac{2L}{km}} \text{ et } b = 2L$$

Dans ce monde semi-réaliste, pour une longueur de véhicule et un temps de réaction donnés, le débit d'une route en situation de saturation de trafic est une fonction hyperbolique de la vitesse. Lorsque la vitesse augmente, le débit augmente jusqu'à atteindre un maximum puis il diminue pour tendre vers une valeur nulle. La vitesse optimale est donnée par la formule (10). A la vitesse optimale, le débit maximal est inversement proportionnel au temps de réaction des conducteurs. Si la piste comprend d'autres voies de circulation, la méthode s'applique et le raisonnement est similaire, à condition que les conducteurs ne changent pas de voie.

Les mathématiques nous montrent que pour contribuer à la décongestion des routes, les conducteurs, impliqués dans la congestion, doivent appliquer les règles d'or suivantes :

- Adopter la vitesse du flux et essayer de la maintenir constante,
- Avoir un comportement à caractère collectif et non individualiste.
- Sur toutes les voies de circulation, on adopte la même vitesse,
- Ne pas tenter donc de changer de voie pour ne pas perturber le flux adjacent.

Application numérique

La formule (10) permet de calculer la vitesse optimale d'un trafic routier en situation de saturation. Pour cela, on retient les hypothèses suivantes :

- Longueur d'un véhicule : $L = 4\text{m}$
- Constante de freinage $1/2 \text{ k.m}$ (coefficient de proportionnalité entre la distance de freinage d_c et le carré de la vitesse V^2) :

$$1/2 \text{ k.m} = 0,0635 \text{ s}^2/\text{m} \quad (\text{voir tableau 1}).$$

En introduisant les valeurs de L et de $k.m$ dans la formule (10): $V_{opt} = \sqrt{\frac{2L}{k.m}}$, on obtient :

$$V_{opt} = \sqrt{\frac{2 \times 4}{2 \times 0,0635}}$$

$$V_{opt} = 7,9368 \text{ m/s}$$

soit :

$$V_{opt} = 28,57 \text{ km/h}$$

Compte tenu des hypothèses retenues, les véhicules doivent observer une vitesse limitée à 28,57 km/h pour atténuer les effets de la congestion du trafic.

Tableau 1 - Constante de freinage $1/2 \text{ k.m}$

Vitesse* V (km/h)	Vitesse* V (m/s)	V^2 (m ² /s ²)	Distance de freinage* d_c (m)	$1/2 \text{ k.m}$ (s ² /m)
40	11,11	123,43	8	0,0648
50	13,89	192,93	12	0,0622
60	16,67	277,89	18	0,0648
70	19,44	377,91	24	0,0635
100	27,78	771,73	48	0,0622
110	30,56	933,91	58	0,0621
120	33,33	1110,89	72	0,0648
MOYENNE				0,0635

*Source : Sécurité routière

Chasse aux idées reçues

En résumé, les calculs mathématiques que nous venons d'effectuer montrent que, pour contribuer à la décongestion des routes, il faut chasser les idées reçues suivantes :

A - *“En état de saturation, pour augmenter le débit du trafic routier et éviter la congestion, il faut rouler plus vite”*. **Faux.**

Ceci n'est vrai que dans un système idéalisé parfait. Dans notre monde réel, il faut, en revanche, adopter la vitesse du flux et essayer de la maintenir constante.

B - *“En état de saturation, pour fluidifier le trafic, il faut toujours se rabattre sur la voie de droite après avoir dépassé un véhicule”*. **Faux.**

Pour améliorer les conditions de circulation, il faut que tous les véhicules roulent à la même vitesse et, surtout, éviter de changer de voie.

1.6 - Conclusion

Si l'on continue notre raisonnement et on tente de modéliser la congestion du trafic dans un monde réel, on se heurte rapidement à la complexité de la tâche et à la nécessité de faire appel à de puissants ordinateurs.

Le modèle simplifié et idéalisé présenté dans l'exemple ci-dessus, a le mérite d'être simple et pédagogique. Il nous a permis de :

- Chasser quelques idées reçues,
- Souligner le rôle que peut jouer le conducteur dans le phénomène de congestion du trafic routier.

Mais, il ne faut pas se faire trop d'illusions car les recommandations ci-dessus ne peuvent, à elles seules, résoudre le problème de la congestion du trafic routier.

Que nous reste-t-il alors comme solution ?

Une seule à mon avis : celle de construire de nouvelles infrastructures routières.

Il est évident que la construction de nouvelles routes entraînera des coûts économiques et sociétaux, mais aussi des impacts sur l'environnement. Ces coûts et ces impacts, que nous saurons mesurer, seront générés uniquement durant la phase d'exécution. Mais, il ne faut pas oublier que ces nouvelles infrastructures, en fluidifiant le trafic, vont compenser la part des coûts économiques et sociétaux et vont réduire à néant la part des impacts sur l'environnement, imputées à la congestion du trafic, et ceci durant toute la période de service des infrastructures.

Il faut donc procéder à l'évaluation des coûts et des impacts, en plus et en moins, et établir un vrai bilan économique, sociétal et environnemental, sans oublier d'y mentionner, à défaut de pouvoir le quantifier, l'apport d'un revêtement tel que le béton, en matière de réduction de la consommation des véhicules et aussi la contribution du béton à la diminution de l'effet de serre grâce à l'effet “Albédo”.

D'un point de vue économique et sociétal, faut-il augmenter la capacité des infrastructures routières ?

2.1 - Le bilan économique et sociétal

2.1.1 - Le bilan économique

2.1.2 - Le bilan sociétal

2.2 - Évaluation du bilan économique et sociétal

2.2.1 - Les hypothèses de calcul

2.2.2 - Les données de l'étude

2.2.3 - Evaluation du bilan économique

2.2.4 - Evaluation du bilan sociétal

2.3 - Conclusion



L'objectif de ce chapitre est de prouver que, du point de vue économique et sociétal, il est rentable de construire de nouvelles infrastructures routières pour fluidifier la circulation routière.

Il est vrai que la construction et l'entretien de nouvelles routes nécessitera des investissements et entraînera des gênes aux usagers et aux riverains. Ces dépenses d'investissement qu'on peut facilement évaluer et ces gênes qu'on saura décrire avec précision, seront à supporter uniquement durant la période d'exécution des travaux (**une durée limitée, de quelques jours à quelques mois**).

Mais, il ne faut pas oublier que la mise en service de ces nouvelles infrastructures routières, en fluidifiant le trafic, vont réduire à néant la part des dépenses énergétiques, les pertes de temps et la part de stress, d'anxiété et d'énervement des conducteurs, imputables à la congestion du trafic, et ceci durant toute la période de service des infrastructures routières (**une durée longue, de quelques années à quelques décennies**).

Pour répondre à la question "D'un point de vue économique et sociétal, faut-il augmenter la capacité des infrastructures routières ?", il est judicieux de procéder à un vrai bilan économique et sociétal.

2.1 - Le bilan économique et sociétal

En ce qui concerne l'aspect économique, il consiste à comparer :

- D'une part, le coût d'investissement global de l'infrastructure routière qui est la somme du coût de construction et des coûts actualisés des travaux d'entretien qui seront effectués durant la période de service. À cela, il faut ajouter les coûts actualisés des gênes à l'utilisateur et aux riverains causées par les travaux de construction et d'entretien.
- D'autre part, les économies réalisées par les usagers en matière de dépenses énergétiques (consommation de carburant) et le gain de temps (augmentation de la productivité des entreprises), du fait de la fluidification du trafic.

En ce qui concerne l'aspect sociétal, il consiste à comparer :

- D'une part, les gênes causées aux usagers et aux riverains durant la période de construction et des périodes d'entretien de l'infrastructure routière (congestion du trafic, stress, anxiété, énervement, bruit, pollution, etc.)
- D'autre part, le confort des usagers et des riverains, et le gain de temps des usagers, du fait de la fluidification du trafic et ceci durant toute la période de service.

■ 2.1.1 - Le bilan économique

2.1.1.1 - Le coût d'investissement global de l'infrastructure routière

Il porte sur le coût de l'investissement, sur les coûts d'entretien mais aussi sur le coût des gênes causées aux usagers et aux riverains à l'occasion des travaux pendant une période de service donnée.

Pour tenir compte de l'échelonnement dans le temps des différents coûts (coût de construction, coûts des travaux d'entretien et coût de gênes aux usagers et aux riverains), il est nécessaire d'utiliser un taux d'actualisation pour évaluer les divers coûts à la date de construction de la voirie.

Le coût global " C_t " est ainsi exprimé en valeur actualisée. Il représente la somme dont on doit disposer au moment de la construction pour réaliser et entretenir une route sur une période de service prévue.

L'expression du **coût global " C_t "** s'écrit alors :

$$C_t = P_c + (E_c) \text{ actualisé} + (C_g) \text{ actualisé} \quad (11)$$

Avec :

P_c : coût de construction

(E_c) **actualisé** : ensemble des coûts d'entretien actualisés sur la période de service,

(C_g) **actualisé** : ensemble des coûts des gênes aux usagers et aux riverains durant les travaux de construction et d'entretien.



Comment actualiser les coûts d'entretien ?

Pour pouvoir effectuer une intégration des coûts de construction, d'entretien et de gênes, il est nécessaire d'utiliser un taux d'actualisation pour ramener tous les coûts à la date de construction du projet, les dépenses étant décalées dans le temps.

La valeur du taux d'actualisation "a" est égale à la différence entre l'intérêt sur le capital d'emprunt et l'inflation. On admet que le taux d'actualisation, d'une année sur l'autre, est constant. Ainsi, le **coefficient d'actualisation "C_a" de l'année "j" à l'année zéro "0"** s'écrit :

$$C_a = 1/(1+a)^j \quad (12)$$

Avec :

a : taux d'actualisation

C_a : coefficient d'actualisation de l'année "j" à l'année "0".

Expression du coût d'entretien actualisé: (Ec) actualisé

La méthode consiste à évaluer, à l'aide de l'expression (12), les coûts d'entretien actualisés en partant de scénarios d'entretien connus et établis sur la base du comportement réel des structures existantes. Si un tel scénario prévoit pour une structure donnée, durant la période de service, des travaux d'entretien aux âges "i", "j" et "k" dont les coûts - valeurs le jour de l'étude - sont respectivement (Ec)_i, (Ec)_j et (Ec)_k, l'expression (13) permet d'évaluer le coût d'entretien actualisé sur une période donnée :

$$(E_c) \text{ actualisé} = (E_c)_i / (1+a)^i + (E_c)_j / (1+a)^j + (E_c)_k / (1+a)^k \quad (13)$$

Expression du coût de gênes actualisé : (C_g) actualisé

Il s'agit de comptabiliser les coûts actualisés de gênes aux usagers et aux riverains causées par les travaux de construction et d'entretien. Si les travaux d'entretien sont prévus aux échéances "i", "j" et "k", l'expression du coût total (C_g) actualisé des gênes causées par les travaux est donnée par l'expression (14) :

$$(C_g) \text{ actualisé} = C_{gc} + (C_{ge})_i / (1+a)^i + (C_{ge})_j / (1+a)^j + (C_{ge})_k / (1+a)^k \quad (14)$$

Avec :

C_{gc} : coût des gênes durant les travaux de construction

(C_{ge})_i ; **(C_{ge})_j** ; **(C_{ge})_k** sont respectivement les coûts des gênes causées par les travaux d'entretien aux échéances i, j et k.

Expression du coût global “C_t”

Les relations (1), (3) et (4) donnent l’expression détaillée (15) du coût global “C_t” pour une période de service “N” donnée.

$$C_t = P_c + (E_c)_i / (1+a)^i + (E_c)_j / (1+a)^j + (E_c)_k / (1+a)^k + C_{gc} + (C_{ge})_i / (1+a)^i + (C_{ge})_j / (1+a)^j + (C_{ge})_k / (1+a)^k \quad (15)$$

Connaissant les valeurs de P_c , C_{gc} , $(E_c)_i$, $(E_c)_j$, $(E_c)_k$, $(C_{ge})_i$, $(C_{ge})_j$, $(C_{ge})_k$, a , i , j , et k , on peut évaluer par l’expression (15) l’impact économique global de la construction et de l’entretien de l’infrastructure routière sur la période de comparaison.

2.1.1.2 - Les économies réalisées par les usagers

Les économies réalisées par les usagers, du fait de la fluidification du trafic, sont de deux types :

- Les économies en matière de dépenses énergétiques (consommation de carburant),
- Les économies correspondant au gain de temps (augmentation de la productivité des entreprises).

Ces économies ont un caractère permanent et durent tant que la route est en service et que les conditions de fluidité du trafic existent. Elles s’accumulent année après année, tout au long de la période de service choisie pour la route.

Pour tenir compte de l’échelonnement dans le temps des différentes économies, il est nécessaire d’utiliser un taux d’actualisation pour évaluer les différentes économies à la date de construction de la voirie.

Somme des économies de dépenses énergétiques actualisées

Comme les économies de dépenses énergétiques sont réalisées d’une façon continue, il est, dès lors, judicieux de déterminer les économies réalisées chaque année $(E_{de})_i = 1, \dots, n$ et de procéder ensuite à l’évaluation de l’économie globale $(E_{de})_g$ pour une période de service “n”, moyennant l’expression (16) :

$$(E_{de})_g = (E_{de})_1 / (1+a)^1 + (E_{de})_2 / (1+a)^2 + \dots + (E_{de})_n / (1+a)^n \quad (16)$$

Somme des économies, liées aux gains de temps, actualisées

Comme les économies de gain de temps sont réalisées d’une façon continue, il est, dès lors, judicieux de déterminer les économies réalisées chaque année $(E_{gt})_i = 1, \dots, n$ et de procéder ensuite à l’évaluation de l’économie globale $(E_{gt})_g$ pour une période de service “n”, moyennant l’expression (17) :

$$(E_{gt})_g = (E_{gt})_1 / (1+a)^1 + (E_{gt})_2 / (1+a)^2 + \dots + (E_{gt})_n / (1+a)^n \quad (17)$$

Economie globale “Eg”

Pour une période de comparaison “n” donnée, l'économie globale “E_g” générée par suite de la fluidification du trafic routier, exprimée en valeurs actualisées, est donnée par l'expression (18) :

$$E_g = (E_{de})_g + (E_{gt})_g \quad (18)$$

Les relations (16), (17) et (18) donnent l'expression détaillée (19) de l'économie globale “E_g” :

$$E_g = (E_{de})_1 / (1+a)^1 + \dots + (E_{de})_n / (1+a)^n + (E_{gt})_1 / (1+a)^1 + \dots + (E_{gt})_n / (1+a)^n \quad (19)$$

Connaissant les valeurs de (E_{de})₁,..., (E_{de})_n, (E_{gt})₁,..., (E_{gt})_n, a, n, on peut évaluer par l'expression (19) l'économie globale de l'infrastructure routière sur la période de comparaison.

■ **2.1.2 - Le bilan sociétal**

2.1.2.1 - Les gênes causées aux usagers et aux riverains durant les phases construction et entretien de l'infrastructure routière

Elles représentent la somme arithmétique des périodes de gênes subies par les usagers et les riverains durant la phase de construction de l'infrastructure routière et des périodes correspondant à son entretien. Elles s'expriment en jours ou en heures de gênes subies.

2.1.2.2 - Le confort des usagers et des riverains, et le gain de temps des usagers, du fait de la fluidification du trafic

Ils représentent la somme arithmétique des périodes de confort apportées aux usagers et aux riverains, ainsi que le gain de temps dont bénéficient les usagers, par suite de la fluidification du trafic, et ceci durant toute la période de service (excepté les périodes de gênes au moment des travaux d'entretien). Elles s'expriment en jours ou en heures de confort/gain de temps.

2.2 - Évaluation du bilan économique et sociétal

■ **2.2.1 - Les hypothèses de calcul**

Dans le but de comparer les aspects économiques et sociétaux, une analyse détaillée a été menée avec les hypothèses suivantes :

2.2.1.1 - Caractéristiques géométriques

Le projet à étudier est une section de voie routière d'un kilomètre de longueur et de 4 m de largeur.

2.2.1.2 - Structures prises en compte

Les calculs sont réalisés pour 4 structures de chaussées avec les hypothèses suivantes :

- classe de trafic : TC6 (1 000 PL/J, NE=15 000 000)
- poids lourds : 10 % du trafic
- classe de la plateforme support : PF3
- durée de dimensionnement : 30 ans.

Les structures de chaussées retenues sont :

Structure 1 : Dalles goudonnées sur béton maigre :

BC5g 20 cm / BC3 15 cm

Structure 2 : Dalles goudonnées sur Grave Bitume :

BC5g 18 cm / GB3 10 cm

Structure 3 : Béton armé continu sur béton maigre :

BAC 18 cm / BC3 15 cm

Structure 4 : BAC sur grave bitume : BAC 16 cm / GB3 10 cm

Nota

- Il a été retenu une densité de 2,45 pour tous les bétons et une densité de 2,35 pour tous les produits bitumineux.
- Pour la dalle goudonnée, le calcul a été fait à raison de 12 goujons par voie de circulation. Ces goujons ont une longueur de 45 cm et un diamètre de 30 mm (conformément à la norme NF P 98-170). Ceci donne, au mètre carré de chaussées, un pourcentage en poids de l'acier par rapport au béton de 0,4 %.
- Pour le béton armé continu, le calcul a été fait sur la base d'un taux d'acier de 0,67 % par rapport à la section béton. Ceci donne, au mètre carré de chaussées, un pourcentage en poids de l'acier par rapport au béton de 2,36 %.

2.2.1.3 - Les séquences d'entretien

À partir des constatations effectuées sur les chaussées neuves, et compte tenu de l'amélioration des méthodes et techniques de construction et d'entretien, il a été établi de façon pragmatique des scénarios plausibles pour les différentes structures envisagées, sur une période de 30 ans, qui s'établissent comme suit :

- **Pour la structure 1 (BC5g/BC3) et la structure 2 (BC5g/GB3)**
 - Garnissage périodique des joints tous les 10 ans ;
 - Régénérescence de l'adhérence, tous les 10 ans, par grenailage
- **Pour la structure 3 (BAC/BC3) et la structure 4 (BAC/GB3)**
 - Régénérescence de l'adhérence, tous les 10 ans, par grenailage.

■ 2.2.2 - Les données de l'étude2.2.2.1 - Données relatives aux coûts de construction et d'entretien de chaussées

- Coût d'un m³ de béton maigre BC3 mis en place : 125 €
- Coût d'un m³ de béton goudonné BC5g mis en place : 200 €
- Coût d'un m³ de Béton Armé Continu BAC mis en place : 250 €
- Coût d'un m³ de grave bitume GB3 mis en place : 175 €
- Coût d'entretien du revêtement en béton :
 - Garnissage périodique des joints : 2 €/m²
 - Régénérescence de l'adhérence par grenailage : 2 €/m²

2.2.2.2 - Données relatives à la circulation routière

- Deux congestions du trafic par jour :
 - Le matin : 2 heures, de 07h00 à 09h00
 - En fin de journée : 2 heures, de 17h00 à 19h00
- Vitesse de la circulation
 - Vitesse autorisée du trafic : 80 km/h
 - Vitesse moyenne du trafic en période de congestion : 10 km/h
- Consommation des véhicules légers:
 - À vitesse de 80 km/h : 6 l de carburant au 100 km
 - À vitesse de 10 km/h : 15 l de carburant au 100 km
- Consommation des poids lourds :
 - À vitesse de 80 km/h : 25 l de carburant au 100 km
 - À vitesse de 10 km/h : 60 l de carburant au 100 km
- Temps moyen de transport sur 1 km :
 - À vitesse de 80 km/h : 45 secondes
 - À vitesse de 10 km/h : 6 mn ou 360 secondes.
- Nombre de poids lourds au km, en situation de congestion : 20
- Nombre de véhicules légers au km, en situation de congestion : 200
- Nombre de jours de congestion par an : 225
- Nombre de riverains sur un km de voie : 150

2.2.2.3 - Données économiques

- Salaire moyen brut en France : 2 750 €/mois, soit un taux horaire : 23,75 €
- Prix moyen carburant : 1,30 €/l

■ 2.2.3 - Evaluation du bilan économique

Il s'agit de comparer :

- Le coût d'investissement total actualisé sur 30 ans de construction, d'entretien et de gênes d'une voie routière de longueur 1 km et de largeur 4 m, destinée à décongestionner la circulation routière,
- Les impacts économiques de la circulation routière en situation de congestion ou les économies générées par la fluidification du trafic grâce à l'augmentation de la capacité de l'infrastructure routière.

À partir des données relatives aux coûts de construction et d'entretien des chaussées, le tableau 1 donne l'évaluation du coût total actualisé sur 30 ans d'une voie routière de longueur 1 km et de largeur 4 m, pour les quatre structures de chaussées sélectionnées pour cette étude. Le coût total actualisé comprend le coût de construction de la chaussée, le coût des terrassements, le coût de la signalisation, les coûts d'entretien actualisé de la chaussée sur la période de service de 30 ans. Il ne comprend ni le coût du foncier, ni le coût éventuel des travaux sur ouvrages d'art existants ou à construire.

Le tableau 2 montre que le coût d'investissement total actualisé sur 30 ans pour construire et entretenir une voie routière de longueur 1 km et de largeur 4 m varie, en fonction de la structure de chaussée envisagée, entre 657 853 € et 772 926 € HT.

Structures	Coût de construction chaussée (€)	Coût de construction total (Chaussées + terrassements + signalisation, mais non compris le coût du foncier)	Coût d'entretien à 10 ans (€)	Coût d'entretien à 20 ans (€)	Coût Total (€ HT)
Structure 1 20 cm BC5g/15 cm BC3	235 000	705 000	9 823	6 030	720 853
Structure 2 18 cm BC5g/10 cm GB3	214 000	642 000	9 823	6 030	657 853
Structure 3 18 cm BAC/15 cm BC3	255 000	765 000	4 911	3 015	772 926
Structure 4 16 cm BAC/10 cm GB3	230 000	690 000	4 911	3 015	697 926

En outre, à partir de données relatives aux gênes causées par les travaux de construction et d'entretien de l'infrastructure, le tableau 3 donne l'évaluation du coût actualisé de gênes aux usagers et aux riverains. Ce tableau montre que le coût sociétal induit par la congestion routière occasionnée par les travaux de construction et d'entretien de l'infrastructure routière (longueur 1 km et largeur 4 m) peut être relativement élevé.

En effet, ce coût varie entre 2 177 083 et 2 699 583 € HT en fonction de la structure de chaussée envisagée.

Tableau 3 - Coût de gênes cumulés sur 30 ans engendrés par la construction et l'entretien d'une voie routière de longueur 1 km et de largeur 4 m

Structures	Coût de gênes dues aux Terrassements (€)	Coût de gênes dues aux Travaux de chaussées (€)	Coût de gênes dues aux Travaux de signalisation (€)	Coût de gênes dues aux travaux d'entretien à 10 ans (€)	Coût de gênes dues aux travaux d'entretien à 20 ans (€)	Coût Total (€ HT)
Structure 1 20 cm BC5g/15 cm BC3	1 306 250	435 417	435 417	174 167	174 167	2 525 417
Structure 2 18 cm BC5g/10 cm GB3	1 045 000	348 333	435 417	174 167	174 167	2 177 083
Structure 3 18 cm BAC/15 cm BC3	1 306 250	609 583	435 417	174 167	174 167	2 699 583
Structure 4 16 cm BAC/10 cm GB3	957 917	522 500	435 417	174 167	174 167	2 264 167

Enfin, le tableau 4 donne le coût total d'une voie (longueur 1 km, largeur 4 m) sur une période de 30 ans. Il montre que les coûts économiques et sociétaux de la construction et d'entretien, pour 30 ans d'un km de voie de largeur 4 m, varient entre 2 834 932 € et 3 472 509 € en fonction de la structure de chaussée envisagée.

Tableau 4 - Coût total actualisé d'une voie de 1 km de longueur et de 4 m de largeur sur 30 ans

Structures	Coût de construction et d'entretien (€)	Coûts des gênes aux usagers et riverains (€)	Coût Total (€ HT)
Structure 1 20 cm BC5g/15 cm BC3	720 853	2 525 417	3 246 270
Structure 2 18 cm BC5g/10 cm GB3	657 853	2 177 083	2 834 936
Structure 3 18 cm BAC/15 cm BC3	772 926	2 699 583	3 472 509
Structure 4 16 cm BAC/10 cm GB3	697 926	2 264 167	2 962 093

**Tableau 5 - Impacts économiques de la circulation en situation de congestion
Pour 1 km de voie de 4 m de large**

Indicateur	Surconsommation PL/30 ans	Surconsommation vh/30 ans	Perte de temps/30 ans	Total
Coût actualisé année 1	7,80E+04	2,0057E+05	3,9188E+06	4,1193E+06
Coût actualisé année 2	7,43E+04	1,9102E+05	3,7321E+06	3,9232E+06
Coût actualisé année 3	7,07E+04	1,8192E+05	3,5544E+06	3,7363E+06
Coût actualisé année 4	6,74E+04	1,7326E+05	3,3852E+06	3,5584E+06
Coût actualisé année 5	6,42E+04	1,6501E+05	3,2240E+06	3,3890E+06
Coût actualisé année 6	6,11E+04	1,5715E+05	3,0704E+06	3,2276E+06
Coût actualisé année 7	5,82E+04	1,4967E+05	2,9242E+06	3,0739E+06
Coût actualisé année 8	5,54E+04	1,4254E+05	2,7850E+06	2,9275E+06
Coût actualisé année 9	5,28E+04	1,3575E+05	2,6524E+06	2,7881E+06
Coût actualisé année 10	5,03E+04	1,2929E+05	2,5261E+06	2,6554E+06
Coût actualisé année 11	4,79E+04	1,2313E+05	2,4058E+06	2,5289E+06
Coût actualisé année 12	4,56E+04	1,1727E+05	2,2912E+06	2,4085E+06
Coût actualisé année 13	4,34E+04	1,1169E+05	2,1821E+06	2,2938E+06
Coût actualisé année 14	4,14E+04	1,0637E+05	2,0782E+06	2,1846E+06
Coût actualisé année 15	3,94E+04	1,0130E+05	1,9792E+06	2,0805E+06
Coût actualisé année 16	3,75E+04	9,6478E+04	1,8850E+06	1,9815E+06
Coût actualisé année 17	3,57E+04	9,1884E+04	1,7952E+06	1,8871E+06
Coût actualisé année 18	3,40E+04	8,7509E+04	1,7097E+06	1,7972E+06
Coût actualisé année 19	3,24E+04	8,3342E+04	1,6283E+06	1,7117E+06
Coût actualisé année 20	3,09E+04	7,9373E+04	1,5508E+06	1,6302E+06
Coût actualisé année 21	2,94E+04	7,5593E+04	1,4769E+06	1,5525E+06
Coût actualisé année 22	2,80E+04	7,1994E+04	1,4066E+06	1,4786E+06
Coût actualisé année 23	2,67E+04	6,8565E+04	1,3396E+06	1,4082E+06
Coût actualisé année 24	2,54E+04	6,5300E+04	1,2758E+06	1,3411E+06
Coût actualisé année 25	2,42E+04	6,2191E+04	1,2151E+06	1,2773E+06
Coût actualisé année 26	2,30E+04	5,9229E+04	1,1572E+06	1,2164E+06
Coût actualisé année 27	2,19E+04	5,6409E+04	1,1021E+06	1,1585E+06
Coût actualisé année 28	2,09E+04	5,3723E+04	1,0496E+06	1,1034E+06
Coût actualisé année 29	1,99E+04	5,1164E+04	9,9965E+05	1,0508E+06
Coût actualisé année 30	1,89E+04	4,8728E+04	9,5205E+05	1,0008E+06
TOTAL	1,26E+06	3,2374E+06	6,3253E+07	6,7749E+07

D'autre part, à partir des données relatives à la circulation routière et aux données économiques, le tableau 5 donne l'évaluation des impacts économiques de la circulation routière en situation de congestion, pour 1 km de voie de largeur 4 m. Plus précisément, le tableau 5 donne en coût actualisé sur une période de 30 ans :

- Le coût actualisé de la surconsommation des Poids Lourds sur 30 ans qui s'élève à 1,26 millions d'euros,
- Le coût actualisé de la surconsommation des Véhicules Légers sur 30 ans qui s'élève à 3,24 millions d'euros,
- Le coût actualisé des pertes de temps des usagers sur 30 ans qui s'élève à 63,25 millions d'euros.

Le tableau 5 montre que les coûts économiques de la congestion routière totalisent donc 67 750 000 € sur une période de service de 30 ans.

En examinant les tableaux 4 et 5, on constate que le bilan économique est largement favorable à une politique d'augmentation de la capacité des infrastructures routières, quelle que soit la structure de chaussée envisagée.

■ 2.2.4 - Evaluation du bilan sociétal

Il s'agit de comparer :

- Le temps cumulé des périodes de gênes subies par les usagers et les riverains durant la phase de construction d'une voie routière de longueur 1 km et de largeur 4 m et des périodes correspondants à son entretien. Elles s'expriment en heures de gênes subies.
- L'impact sociétal de la circulation routière en situation de congestion (temps cumulé de gênes subies par les usagers et les riverains durant la période de service de 30 ans) ou le temps cumulé des périodes de confort apportées aux usagers et aux riverains, ainsi que le gain de temps dont bénéficient les usagers, par suite de la fluidification du trafic, et ceci durant toute la période de service (excepté les périodes de gênes au moment des travaux d'entretien). Ils s'expriment en heures de confort/gain de temps.

À partir des données relatives à la circulation routière, le tableau 6 donne l'évaluation du temps de gênes cumulé sur 30 ans, engendrées par la construction et l'entretien d'une voie routière de longueur 1 km et de largeur 4 m, pour les quatre structures de chaussées sélectionnées pour cette étude. Le temps de gênes subies par les usagers et les riverains correspond à la période de construction de la chaussée, des terrassements, de la signalisation et le temps correspondant aux périodes d'entretien de la chaussée sur la période de service de 30 ans.

Le tableau 6 montre que le temps de gênes pour construire et entretenir sur 30 ans une voie routière de longueur 1 km et de largeur 4 m, varie entre 91 667 et 113 667 heures, en fonction de la structure de chaussée sélectionnée.

D'autre part, à partir des données relatives à la circulation routière et aux données économiques, le tableau 7 donne l'évaluation des impacts sociétaux de la circulation routière en situation de congestion, pour 1 km de voie de largeur 4 m. Plus précisément, le tableau 7 donne en cumulé sur une période de 30 ans :

- Le temps de gênes subies par les usagers à cause d'une situation permanente de congestion du trafic routier et qui s'élève à 5 197 500 heures,

• Le temps de gênes subies par les riverains à cause d'une situation permanente de congestion du trafic routier et qui s'élève à 4 050 000 heures.

Tableau 6 - Temps de gênes cumulé sur 30 ans engendrées par la construction et l'entretien d'une voie routière de longueur 1 km et de largeur 4 m						
Structures	Temps de gênes dues aux Terrassements (h)	Temps de gênes dues aux Travaux de chaussées (h)	Temps de gênes dues aux Travaux de signalisation (h)	Temps de gênes dues aux travaux d'entretien à 10 ans (h)	Temps de gênes dues aux travaux d'entretien à 20 ans (h)	Total (h)
Structure 1 20 cm BC5g/15 cm BC3	55 000	18 333	18 333	7 333	7 333	106 333
Structure 2 18 cm BC5g/10 cm GB3	44 000	14 667	18 333	7 333	7 333	91 667
Structure 3 18 cm BAC/15 cm BC3	55 000	25 667	18 333	7 333	7 333	113 667
Structure 4 16 cm BAC/10 cm GB3	40 333	22 000	18 333	7 333	7 333	95 333

Le tableau 7 montre que les impacts sociétaux engendrés par la congestion routière totalisent donc 9 247 500 heures sur une période de service de 30 ans.

Tableau 7 - Gênes aux usagers et riverains, cumulées sur 30 ans et engendrées par la congestion du trafic sur 1 km de voie		
Gênes usagers cumulées sur 30 ans (h)	Gênes riverains cumulées sur 30 ans (h)	Total (h)
5 197 500	4 050 000	9 247 500

En examinant les tableaux 6 et 7, on constate que le bilan sociétal est largement favorable à une politique d'augmentation de la capacité des infrastructures routières, quelle que soit la structure de chaussée envisagée.

2.3 - Conclusion

Le bilan économique et sociétal qui vient d'être évalué dans l'exemple ci-dessus a permis de :

- Prouver qu'il est de l'intérêt de la communauté, sur le plan économique et sociétal, d'augmenter la capacité des infrastructures routières qui se trouvent régulièrement en situation de congestion.
- Le bilan économique, évalué sur une période de 30 ans, est largement en faveur de la construction de nouvelles infrastructures routières. En effet, l'investissement (construction + entretiens + gênes sur 30 ans) qui s'élève, en valeurs actualisées, à environ 3 millions d'euros, permet d'engendrer une économie de carburant et de temps aux usagers s'élevant à plus de 67 millions d'euros.
- Le bilan sociétal, évalué sur une période de 30 ans, est aussi largement en faveur de la construction de nouvelles infrastructures routières. En effet, les gênes subies par les usagers et les riverains durant les périodes de travaux (construction + entretiens sur 30 ans d'un km de voie) qui s'élèvent, en cumulé, à environ 100 000 heures, sont largement compensées par les économies de gênes et de pertes de temps aux usagers et aux riverains apportées par la nouvelle infrastructure et qui s'élèvent à plus de 9 millions d'heures.
- Enfin, le bilan économique et sociétal est largement en faveur de la construction de nouvelles infrastructures routières quelle que soit la structure de chaussée béton envisagée.

Ce bilan économique et sociétal présente un écart tellement important en faveur d'une augmentation de la capacité des infrastructures routières qu'une étude de sensibilité ne paraît pas justifiée. Pour compléter cette étude, il reste à réaliser un bilan environnemental.



D'un point de vue environnemental, faut-il augmenter la capacité des infrastructures routières ?

3.1 - Le bilan environnemental

3.1.1 - L'impact global généré par une nouvelle infrastructure routière

3.1.2 - Les impacts dus à la surconsommation de carburant (véhicules légers et poids lourds)

3.2 – Évaluation du bilan environnemental

3.2.1 - Les hypothèses de calcul

3.2.2 - Les données environnementales de l'étude

3.2.3 - Évaluation du bilan environnemental

3.2.4 - Les enjeux de ce bilan environnemental

3.2.5 - Facteurs favorables au béton, non pris en compte dans le bilan

3.3 – Conclusion



L'objectif de ce chapitre est de prouver que, du point de vue environnemental, il est aussi rentable de construire de nouvelles infrastructures routières pour fluidifier la circulation routière.

Il est vrai que la construction et l'entretien de nouvelles routes engendrent des impacts sur l'environnement. Ces impacts qu'on saura décrire avec précision, et qu'on peut facilement évaluer, seront générés uniquement durant la période d'exécution des travaux de construction et d'entretien (une durée limitée : de quelques jours à quelques mois).

Mais il ne faut pas oublier que la mise en service de ces nouvelles infrastructures routières, en fluidifiant le trafic, vont réduire à néant la part des impacts imputables à la congestion du trafic, et ceci durant toute la période de service des infrastructures routières (une durée longue : de quelques années à quelques décennies). Pour répondre à la question **“Faut-il alors augmenter la capacité des infrastructures routières ?”**, il est judicieux de procéder à un vrai bilan environnemental.

3.1 - Le bilan environnemental

Il consiste à comparer :

- D'une part, **l'impact global généré par une nouvelle infrastructure routière** qui est la somme arithmétique des impacts générés par les travaux de construction et par les travaux d'entretien effectués durant la période de service. À cela, il convient d'ajouter les impacts dus à la surconsommation de carburant, générés par la congestion du trafic imputable aux travaux de construction et d'entretien.
- D'autre part, **les impacts dus à la surconsommation de carburant** (véhicules légers et poids lourds), générés par la circulation en situation de congestion durant toute la période de service prévue ou, ce qui revient au même, les impacts épargnés du fait de la fluidification du trafic.

■ 3.1.1 - L'impact global généré par une nouvelle infrastructure routière

C'est la somme arithmétique des impacts " I_c " émis durant les travaux de construction, des impacts " I_e " générés durant les opérations d'entretien effectués pendant une période de service donnée et des impacts " I_s " dus à la surconsommation de carburant, générés par la congestion du trafic causée par les travaux de construction et d'entretien.

L'expression de l'impact global " I_t " s'écrit alors :

$$I_t = I_c + I_e + I_s \quad (20)$$

3.1.1.1 - Expression des impacts générés par la phase construction : I_c

La méthode consiste à additionner les impacts générés pendant les phases de construction de l'infrastructure. Ces impacts sont évalués de façon rigoureuse à l'aide de la méthode d'analyse de cycle de vie ACV. Elle consiste à comptabiliser les flux de matières et d'énergie ainsi que les impacts environnementaux liés à l'ensemble des processus associés à la réalisation de l'infrastructure routière. Ic inclut toutes les étapes, de l'extraction des matières premières jusqu'à la mise en service de la route, en passant par les phases de transport, de fabrication des matériaux et leur mise en œuvre.

$$I_c = I_{emp} + I_{tmp} + I_f + I_{tm} + I_{mo} \quad (21)$$

Avec :

I_{emp} : impacts générés par l'extraction des matières premières nécessaires à la fabrication des matériaux routiers,

I_{tmp} : impacts générés par le transport des matières premières des sites d'extraction jusqu'à la centrale de fabrication des matériaux routiers,

I_f : impacts générés par la fabrication des matériaux routiers,

I_{tm} : impacts générés par le transport des matériaux routiers de la centrale de fabrication jusqu'au chantier,

I_{mo} : impacts générés par la mise en œuvre des matériaux routiers.

3.1.1.2 - Expression des impacts générés par les entretiens de la route : I_e

La méthode consiste à additionner les impacts générés pendant les phases d'entretien de l'infrastructure. Ces impacts sont évalués de façon rigoureuse à l'aide de la méthode d'analyse de cycle de vie ACV. Elle consiste à comptabiliser les flux de matières et d'énergie ainsi que les impacts environnementaux liés à l'ensemble des processus associés à la réalisation des travaux d'entretien de l'infrastructure routière durant la période de service prévue. " I_e " inclut toutes les étapes, de l'extraction des matières premières jusqu'à la remise en service de la route, en passant par les phases de transport, de fabrication des matériaux et leur mise en œuvre.

$$I_e = I_{e1} + I_{e2} + \dots + I_{ej} \quad (22)$$

Avec : $e1, e2, \dots, ej$: impacts générés par les travaux d'entretien successifs de la route.

3.1.1.3 - Expression des impacts dus à la surconsommation des véhicules, générés par la congestion du trafic causée par les travaux de construction et d'entretien : I_s

Connaissant le trafic journalier (véhicules légers T_{vlj} , poids lourds T_{plj}), la durée journalière des travaux h , la durée des travaux de construction J_c et les durées des différents travaux d'entretien $J_{e1}, J_{e2}, \dots, J_{ej}$, les surconsommations des véhicules légers ($C'_{vc} - C'_{vf}$) et des poids lourds ($C_{vc} - C_{vf}$) causées par la congestion et l'inventaire de cycle de vie du fioul (ICV)_{fioul}, on peut évaluer les impacts sur l'environnement " I_s " dus à la surconsommation des véhicules légers et des poids lourds, générés par la congestion du trafic durant toutes les périodes de travaux de construction et d'entretien, par l'intermédiaire de l'expression (23) :

$$I_s = [T_{plj} \cdot (C_{vc} - C_{vf}) + T_{vlj} \cdot (C'_{vc} - C'_{vf})] \cdot h/24 \cdot (J_c + J_{e1} + J_{e2} + \dots + J_{ej}) \cdot (ICV)_{fioul} \quad (23)$$

Avec :

- C_{vc} : consommation au km d'un poids lourd en situation d'un trafic congestionné,
- C_{vf} : consommation au km d'un poids lourd en situation d'un trafic fluide,
- C'_{vc} : consommation au km d'un véhicule léger en situation d'un trafic congestionné,
- C'_{vf} : consommation au km d'un véhicule léger en situation d'un trafic fluide.

■ 3.1.2 - Les impacts dus à la surconsommation de carburant (véhicules légers et poids lourds)

Les impacts, dus à la surconsommation de carburant, générés par la circulation en situation de congestion ou, ce qui revient au même, la diminution des impacts engendrés par les véhicules du fait de la fluidification du trafic, ont un caractère permanent et durent tant que la route est en service et que les conditions de fluidité du trafic existent. Ils s'accumulent année après année, tout au long de la période de service choisie pour la route.

Comme les impacts, dus à la surconsommation de carburant, générés par la circulation en situation de congestion sont engendrés de façon permanente, il est, dès lors, judicieux de déterminer les impacts réalisés chaque année (I_{sc_i}) _{$i=1, \dots, n$} et de procéder ensuite à l'évaluation de l'impact global (I_{sc_g}) pour une période de service " n ", moyennant l'expression (24) :

$$(I_{sc})_g = (I_{sc})_1 + (I_{sc})_2 + \dots + (I_{sc})_n \quad (24)$$

Toutefois, on peut supposer que les impacts sur l'environnement dus à la surconsommation de carburant sont constants d'une année sur l'autre (I_{sc}). On peut donc simplifier l'équation (24) comme suit :

$$(I_{sc})_g = n \cdot (I_{sc}) \quad (25)$$

Avec :

n : période de service,

(I_{sc}) : impacts annuels sur l'environnement dus à la surconsommation de carburant.

Connaissant le nombre de véhicules légers N_{vl} et celui de poids lourds N_{pl} par kilomètre de voie en situation de congestion, la durée de chaque congestion " h ", le nombre de congestion par jour " c ", la vitesse moyenne des véhicules en situation de congestion " V_c ", le nombre de jours de congestion par an " J ", les surconsommations au km des véhicules légers ($C'_{vc} - C'_{vf}$) et des poids lourds ($C_{vc} - C_{vf}$) causées par la congestion et l'inventaire de cycle de vie du fioul " $(ICV)_{fioul}$ ", on peut évaluer les impacts sur l'environnement " I_{sc} " dus à la surconsommation des véhicules légers et des poids lourds, générés par la congestion du trafic durant une année, par l'intermédiaire de l'expression (26) :

$$I_{sc} = [(C'_{vc} - C'_{vf}) \cdot N_{vl} + (C_{vc} - C_{vf}) \cdot N_{pl}] \cdot h \cdot c \cdot V_c \cdot J \cdot (ICV)_{fioul} \quad (26)$$

Les expressions (25) et (26) permettent de déterminer les impacts globaux " $(I_{sc})_g$ " dus à la surconsommation des véhicules sur une période de service " n ", moyennant l'expression (27) :

$$(I_{sc})_g = n \cdot [(C'_{vc} - C'_{vf}) \cdot N_{vl} + (C_{vc} - C_{vf}) \cdot N_{pl}] \cdot h \cdot c \cdot V_c \cdot J \cdot (ICV)_{fioul} \quad (27)$$

3.2 - Évaluation du bilan environnemental

■ 3.2.1 - Les hypothèses de calcul

3.2.1.1 - Les données géométriques, structurelles et les scénarios d'entretien

Dans le but de comparer les impacts environnementaux, une analyse détaillée a été menée avec les mêmes hypothèses de calcul (données géométriques, structures, scénarios d'entretien) que dans le bilan économique et sociétal.

3.2.1.2 - Le recyclage en fin de vie

En fin de vie, on fait l'hypothèse que, après démolition, tous les matériaux constitutifs sont transportés sur 20 km afin d'être recyclés en totalité pour d'autres ouvrages.

■ 3.2.2 - Les données environnementales de l'étude

3.2.2.1 - Les inventaires de fabrication des constituants de base

Ils sont issus de différentes sources ou bases de données et sont présentés dans le tableau 8.

Tableau 8 - ICV des constituants élémentaires						
Indicateur	Ciment CEM II/A-L 30% ATILH 2009 (kg)	Bitume Eurobitume 2001 (kg)	Granulat UNPG 2000 (kg)	Eau Ecoinvent (kg)	Goujons/ Armatures Ecoinvent (kg)	Fioul Ecoinvent (litre)
Energie (MJ)	4,3954E+00	4,3420E+01	5,7980E-02	2,5900E-02	3,5280E+01	3,5420E+01
Eau (kg)	1,1257E+00	1,2390E+00	1,9192E-01	1,0090E+00	2,0800E+01	3,3264E+00
Epuisement des Ressources (kg eq Sb)	1,5939E-03	2,1312E-02	1,2900E-05	2,7600E-05	7,8355E-03	1,6559E-02
Déchets (kg)	2,6821E-02	7,8402E-02	5,8987E-04	7,7000E-06	1,3010E-03	1,0034E-02
Déchets radioactifs (kg)	1,9400E-05	5,4523E-04	7,3737E-04	8,3800E-08	4,0600E-05	5,4266E-02
GES (kg CO ₂)	6,4825E-01	2,7700E-01	2,1132E-03	8,7000E-06	1,7100E+00	2,6353E+00
Acidification (kg SO ₂)	1,8032E-03	5,3300E-03	1,5172E-05	8,5300E-08	4,3400E-03	5,1686E-03
Eutrophisation (kg PO ₄ ³⁻)	2,8600E-04	7,2700E-03	2,4975E-06	5,6800E-09	4,5670E-04	3,5857E-04

3.2.2.2 - Les inventaires de fabrication des mélanges

Tableau 9 - Consommation de fioul par les centrales de malaxage	
Type de centrale	Consommation de carburant (litre fioul / kg de produit fabriqué)
Centrale à béton	0,001
Centrale d'enrobage	0,007

Les consommations de fioul par les centrales de fabrication des mélanges sont données dans le tableau 9.

Les inventaires de fabrication des mélanges, correspondant aux huit indicateurs environnementaux, sont donnés dans le tableau 10.

Les constituants de base sont mélangés dans une centrale de malaxage, dont la consommation est donnée dans le tableau 9. Les indicateurs, correspondant à l'utilisation du diesel, sont obtenus de la base Ecoinvent.

Tableau 10 - ICV centrales de malaxage		
Indicateur	Centrale à Béton	Centrale d'enrobage
Energie (MJ)	3,5420E-02	2,4794E-01
Eau (kg)	3,3264E-03	2,3285E-02
Epuisement des Ressources (kg eq Sb)	1,6559E-05	1,1591E-04
Déchets (kg)	1,0034E-05	7,0238E-05
Déchets radioactifs (kg)	5,4266E-05	3,7986E-04
GES (kg CO ₂)	2,6353E-03	1,8447E-02
Acidification (kg SO ₂)	5,1686E-06	3,6180E-05
Eutrophisation (kg PO ₄ ³⁻)	3,5857E-07	2,5100E-06

À partir de ces données, les impacts de chaque mélange sont évalués pour une quantité correspondant à 1 m² de chaussée, en prenant en compte les pourcentages des différents constituants de base.

3.2.2.3 - Les inventaires de transport des constituants et des mélanges

Les distances de transport, considérées dans la présente étude, pour les constituants de base et les mélanges sont données dans le tableau 11.

On fait l'hypothèse que les constituants de base et les mélanges sont transportés par camion de 40 tonnes.

Tableau 11 - Distances de transport des constituants et des mélanges	
Trajet	Distance
Raffinerie-centrale (bitume)	300 km
Cimenterie-centrale (ciment)	150 km
Carrière-centrale (granulats)	100 km
Acierie-chantier	500 km
(goujons et armatures)	0 km
Eau	20 km
Centrale-chantier (béton prêt à l'emploi et matériaux bitumineux)	20 km
Fin de vie (tous les matériaux)	20 km

Pour obtenir les impacts correspondant au transport des constituants de base et des mélanges (Béton maigre BC3, Béton de Ciment à joints goujonnés BC5g, Béton Armé Continu BAC et Grave Bitume GB3), on a retenu les hypothèses suivantes :

- Les constituants de base (granulats, ciment, eau, goujons ou armatures, bitume) sont transportés de leurs lieux de production jusqu'à la centrale de malaxage, sur des distances évaluées et fournies dans le tableau 11.
- Les mélanges sont transportés de la centrale (centrale d'enrobage, centrale à béton) jusqu'au chantier, sur une distance moyenne, évaluée à 20 km,
- Le transport s'effectue en camion de 40 tonnes, dont la charge utile est de 25 t et dont la consommation s'élève à 39 litres de fuel aux 100 km. Les indicateurs correspondant à la consommation du fuel sont obtenus de la base Ecoinvent. On considère un pouvoir calorifique de 42,8 MJ/kg et une masse volumique de 0,84 kg/l.

À partir de ces données, les impacts générés par le transport, des constituants élémentaires et des mélanges nécessaires à la réalisation d'un m² de chaussée, sont évalués (y compris l'armature pour le BAC ou le goujon pour le BC5g), en prenant en compte les pourcentages des différents constituants de base et selon le pourcentage en masse du béton et de l'acier.

3.2.2.4 - Les inventaires de mise en œuvre

Les consommations de combustibles pour les différentes machines utilisées durant le chantier sont données dans le tableau 12. À partir de ces données, les inventaires de cycle de vie des quatre structures retenues sont évalués pour 1 m² de chaussée.

Tableau 12 - ICV des machines de mise en œuvre et d'entretien		
Type de machine	Consommation (par jour)	Rendement (par jour)
Pelle ou chargeur	75 litres fioul	5 000 m ²
BRH	75 litres fioul	5 000 m ²
Camion 40 t	39 litres fioul	100 km
Coffrage glissant voies	75 litres fioul	BC3 : 4 000 m ² BC5g : 3 000 m ² BAC : 2 500 m ²
Finisseur grave-bitume	82 litres fioul	1 500 m ²
Compacteur grave-bitume	64 litres fioul	1 000 m ²
Pose goujons ou armatures acier	0,58 litres fioul	2 000 ml
Guillotine pour fragmenter les dalles béton	75 litres fioul	5 000 m ²
Machine de grenailage	275 litres fioul	13 000 m ²
Machine de rabotage	75 litres fioul	5 000 m ²
Machine de rabotage	75 litres fioul	300 ml
	0,05 litres bitume/m ² de chaussée	

3.2.2.5 - Les inventaires de la construction

À partir des inventaires de fabrication, de transport, de mise en œuvre, on peut évaluer l'impact construction pour 1 m² et pour les 4 structures envisagées.

En outre, à partir des ICV des machines d'entretien et de fin de vie, on peut évaluer les impacts entretien et fin de vie pour 1 m² et pour les 4 structures envisagées.

Le tableau 13 donne l'ACV cycle construction, entretien, fin de vie pour 1 m² de chaussée et pour les 4 structures envisagées.

Tableau 13 - ACV cycle construction + Entretien + Fin de vie - 1 m ²				
Indicateur	Structure 1	Structure 2	Structure 3	Structure 4
Energie (MJ)	6,6333E+02	9,1767E+02	9,1481E+02	1,1351E+03
Eau (kg)	3,5395E+02	2,7041E+02	5,0679E+02	4,0363E+02
Epuisement des Ressources (kg eq Sb)	2,3728E-01	3,8720E-01	2,8532E-01	4,2763E-01
Déchets (kg)	3,1790E+00	2,7808E+00	2,9689E+00	2,5698E+00
Déchets radioactifs (kg)	6,7258E-01	6,4042E-01	6,2521E-01	5,9319E-01
GES (kg CO ₂)	7,8281E+01	5,7118E+01	8,7465E+01	6,4644E+01
Acidification (kg SO ₂)	2,1773E-01	1,9840E-01	2,3945E-01	2,1593E-01
Eutrophisation (kg PO ₄ ³⁻)	3,3471E-02	9,0354E-02	3,4433E-02	9,0877E-02

■ 3.2.3 - Évaluation du bilan environnemental

Il s'agit de comparer :

- D'une part, **l'impact global de l'infrastructure routière** qui est la somme arithmétique des impacts générés lors des travaux de construction et des travaux d'entretien, effectués durant la période de service ainsi que les impacts dus à la surconsommation des véhicules générés par la congestion du trafic causée par les travaux de construction et d'entretien,
- D'autre part, **les impacts dus à la surconsommation de carburant** (véhicules légers et poids lourds), générés par la circulation en situation de congestion ou épargnés du fait de la fluidification du trafic.

À partir des données relatives aux impacts générés durant la phase de construction et d'entretien des chaussées, le tableau 14 donne l'évaluation des impacts globaux sur 30 ans d'une voie routière de longueur 1 km et de largeur 4 m, pour les quatre structures de chaussées sélectionnées pour cette étude. Les impacts globaux comprennent les impacts engendrés durant les phases de construction de la chaussée, des terrassements, de la signalisation, les impacts provoqués par les travaux d'entretien de la chaussée sur la période de service de 30 ans ainsi que les impacts générés par les travaux de déconstruction en fin de vie de la structure.

Tableau 14 - ACV cycle construction + Entretien + Fin de vie - 1 km de voie de 4 m de large				
Indicateur	Structure 1	Structure 2	Structure 3	Structure 4
Energie (MJ)	2,6533E+06	3,6707E+06	3,6592E+06	4,5404E+06
Eau (kg)	1,4158E+06	1,0816E+06	2,0272E+06	1,6145E+06
Epuisement des Ressources (kg eq Sb)	9,4911E+02	1,5488E+03	1,1413E+03	1,7105E+03
Déchets (kg)	1,2716E+04	1,1123E+04	1,1875E+04	1,0279E+04
Déchets radioactifs (kg)	2,6903E+03	2,5617E+03	2,5008E+03	2,3728E+03
GES (kg CO ₂)	3,1312E+05	2,2847E+05	3,4986E+05	2,5858E+05
Acidification (kg SO ₂)	8,7094E+02	7,9362E+02	9,5781E+02	8,6373E+02
Eutrophisation (kg PO ₄ ³⁻)	1,3388E+02	3,6142E+02	1,3773E+02	3,6351E+02

En outre, à partir de données relatives aux gênes causées par les travaux de construction et d'entretien de l'infrastructure, le tableau 8 donne l'évaluation des impacts dus à la surconsommation des véhicules générés par la congestion du trafic causée par les travaux de construction et d'entretien.

Enfin, le tableau 16, somme des résultats des tableaux 14 et 15, donne les impacts totaux sur 30 ans générés lors des travaux de construction, d'entretien, fin de vie et congestion par une voie de route de longueur 1 km et de largeur 4 m.

D'autre part, à partir des données relatives à la circulation routière et aux données environnementales, le tableau 17 donne l'évaluation des impacts de la circulation routière en situation de congestion, pour 1 km de voie de largeur 4 m. Plus précisément, le tableau 17 donne sur une période de 30 ans :

- Les impacts de la surconsommation des Poids Lourds sur 30 ans,
- Les impacts de la surconsommation des Véhicules Légers sur 30 ans,
- Les impacts totaux des véhicules sur 30 ans.

**Tableau 15 - ICV congestion trafic durant travaux de construction
et d'entretien sur 30 ans - Pour 1 km de voie**

Indicateur	Structure 1	Structure 2	Structure 3	Structure 4
Energie (MJ)	4,28E+05	3,6896E+05	4,5751E+05	3,8372E+05
Eau (kg)	4,02E+04	3,4650E+04	4,2966E+04	3,6036E+04
Epuisement des Ressources (kg eq Sb)	2,00E+02	1,7249E+02	2,1389E+02	1,7939E+02
Déchets (kg)	1,21E+02	1,0452E+02	1,2961E+02	1,0870E+02
Déchets radioactifs (kg)	6,56E+02	5,6527E+02	7,0094E+02	5,8788E+02
GES (kg CO ₂)	3,18E+04	2,7451E+04	3,4039E+04	2,8549E+04
Acidification (kg SO ₂)	6,25E+01	5,3840E+01	6,6761E+01	5,5993E+01
Eutrophisation (kg PO ₄ ³⁻)	4,33E+00	3,7351E+00	4,6315E+00	3,8845E+00

**Tableau 16 - ICV total sur 30 ans d'une voie de 1 km de longueur
et de 4 m de largeur**

Indicateur	Structure 1	Structure 2	Structure 3	Structure 4
Energie (MJ)	3,08E+06	4,0396E+06	4,1168E+06	4,9241E+06
Eau (kg)	1,46E+06	1,1163E+06	2,0701E+06	1,6506E+06
Epuisement des Ressources (kg eq Sb)	1,15E+03	1,7213E+03	1,3552E+03	1,8899E+03
Déchets (kg)	1,28E+04	1,1228E+04	1,2005E+04	1,0388E+04
Déchets radioactifs (kg)	3,35E+03	3,1270E+03	3,2018E+03	2,9606E+03
GES (kg CO ₂)	3,45E+05	2,5592E+05	3,8390E+05	2,8712E+05
Acidification (kg SO ₂)	9,33E+02	8,4745E+02	1,0246E+03	9,1972E+02
Eutrophisation (kg PO ₄ ³⁻)	1,38E+02	3,6515E+02	1,4236E+02	3,6739E+02

**Tableau 17 - ICV de la circulation en situation de congestion -
Pour 1 km de voie de 4 m de large**

Indicateur	Surconsommation Véhicules légers /30 ans	Surconsommation Poids Lourds / 30 ans	Total
Energie (MJ)	1,72E+08	6,6944E+07	2,39E+08
Eau (kg)	1,62E+07	6,2869E+06	2,25E+07
Epuisement des Ressources (kg eq Sb)	8,05E+04	3,1297E+04	1,12E+05
Déchets (kg)	4,88E+04	1,8964E+04	6,77E+04
Déchets radioactifs (kg)	2,64E+05	1,0256E+05	3,66E+05
GES (kg CO ₂)	1,28E+07	4,9807E+06	1,78E+07
Acidification (kg SO ₂)	2,51E+04	9,7687E+03	3,49E+04
Eutrophisation (kg PO ₄ ³⁻)	1,74E+03	6,7770E+02	2,42E+03

Tableau 18 - Bilan environnemental pour 1km de voie et pour une période de service de 30 ans

Indicateur	Moyenne des 4 structures Béton	Surconsommation des véhicules sur 30 ans	Surconsommation véhicules sur 30 ans Moyenne 4 structures Béton
Energie (MJ)	4,04E+06	2,39E+08	59,17
Eau (kg)	1,57E+06	2,25E+07	14,27
Epuisement des Ressources (kg eq Sb)	1,53E+03	1,12E+05	73,11
Déchets (kg)	1,16E+04	6,77E+04	5,83
Déchets radioactifs (kg)	3,16E+03	3,66E+05	115,96
GES (kg CO ₂)	3,18E+05	1,78E+07	55,94
Acidification (kg SO ₂)	9,31E+02	3,49E+04	37,46
Eutrophisation (kg PO ₄ ³⁻)	2,53E+02	2,42E+03	9,56

En examinant les tableaux 16 et 17, on constate que le bilan environnemental est largement favorable à une politique d'augmentation de la capacité des infrastructures routières, quelle que soit la structure de chaussée envisagée (voir tableau 18).

■ 3.2.4 - Les enjeux de ce bilan environnemental

À en croire les informations sur le trafic qui annoncent, matin et soir, 1 000 km de voies en état de congestion sur l'ensemble de la France, le bilan environnemental pour 1 km de voie qu'on vient d'établir se traduirait par des impacts très importants sur l'environnement, durant une période de 30 ans. Les impacts, générés par 1 000 km de voies congestionnées sur 30 ans et présentés dans le tableau 19, compenseraient largement les impacts générés par la création de plusieurs centaines (voire plusieurs milliers) de km de nouvelles infrastructures routières par an, en fonction de l'indicateur environnemental visé.

Tableau 19 - Linéaire de voies constructibles par an à impacts équivalents à 1 000 km de voies congestionnées			
Indicateur	ACV d'un km de voie sur un cycle complet - Moyenne des 4 structures Béton	Surconsommation des véhicules pour 1 000 km de voies et sur 30 ans	Longueur de voies à construire par an pour des impacts équivalents (km)
Energie (MJ)	4,04E+06	2,39E+11	1,97E+03
Eau (kg)	1,57E+06	2,25E+10	4,76E+02
Epuisement des Ressources (kg eq Sb)	1,53E+03	1,12E+08	2,44E+03
Déchets (kg)	1,16E+04	6,77E+07	1,94E+02
Déchets radioactifs (kg)	3,16E+03	3,66E+08	3,87E+03
GES (kg CO ₂)	3,18E+05	1,78E+10	1,86E+03
Acidification (kg SO ₂)	9,31E+02	3,49E+07	1,25E+03
Eutrophisation (kg PO ₄ ³⁻)	2,53E+02	2,42E+06	3,19E+02

■ 3.2.5 - Facteurs favorables au béton, non pris en compte dans le bilan

Ce bilan environnemental a été mené en considérant un certain nombre d'hypothèses relatives à la circulation routière, aux structures de chaussées, aux scénarios d'entretien et aux inventaires de cycle de vie. Mais, il ne saurait être exhaustif. En effet, il n'a pas été pris



Structure réservoir
en béton poreux

en compte certains avantages spécifiques aux structures routières en béton, parfaitement opérationnelles et qui contribuent au quotidien, par leurs effets bénéfiques, à atténuer les impacts de l'activité humaine sur l'environnement. Ce sont des **solutions techniques multifonctions**, dotées de propriétés ou de fonctions agissant positivement sur l'environnement ou "**solutions compensatoires**".

L'infrastructure de transport devient donc une source pour lutter contre certains problèmes tels **le réchauffement climatique (revêtement clair à fort pouvoir réfléchissant, le béton comme puits pour piéger le carbone)**, **les inondations (concept de structure réservoir en matériaux poreux)** ou la **pollution de l'air (matériaux à fonction dépolluante)**.



Béton à fonction dépolluante



Revêtement clair à fort pouvoir réfléchissant



Revêtement clair à fort pouvoir réfléchissant

3.3 - Conclusion

Le bilan environnemental, qui vient d'être évalué dans l'exemple ci-dessus, a permis de :

- Prouver qu'il est de l'intérêt de la communauté, sur le plan environnemental, d'augmenter la capacité des infrastructures routières qui se trouvent régulièrement en situation de congestion.
- Montrer que ce bilan environnemental, évalué pour 1 km de voie sur une période de 30 ans, est largement en faveur de la construction de nouvelles infrastructures routières. En effet, les impacts globaux générés durant les travaux (construction + entretiens + gênes sur 30 ans) sont largement inférieurs à ceux générés par la surconsommation des véhicules, causée par la circulation en situation de congestion.
- Démontrer, enfin, que ce bilan environnemental est largement en faveur de la construction de nouvelles infrastructures routières, quelle que soit la structure de chaussée béton envisagée.

Ce bilan environnemental présente un écart tellement important en faveur d'une augmentation de la capacité des infrastructures routières qu'une étude de sensibilité ne paraît pas justifiée.

Crédits photographiques :
Romualda Holak, Cimbéton, Romain Rivierre/Fenêtre sur cour, X
Tous droits réservés

Réalisation :
Îlot Trésor / sòa
RCS Paris B 408 745 149
Édition décembre 2011



CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

7, place de la Défense • 92974 Paris-la-Défense Cedex • Tél. : 01 55 23 01 00 • Fax : 01 55 23 01 10
E-mail : centrinfo@cimbeton.net • internet : www.infociments.fr