

Rapport d'études

Incidence des PL sur les coûts de construction des chaussées neuves

Sommaire

1 - Méthodologie de l'étude.....	4
2 - Démarche adoptée.....	4
2.1 - Mesure de l'incidence du trafic PL sur les coûts de construction des chaussées neuves....	4
2.2 - Calculs d'agressivité	5
2.3 - Calculs de structures	8
2.4 - Coûts des chaussées.....	10
3 - Résultats	11
3.1 - Agressivité	11
3.2 - Classement des PL.....	13
3.3 - Trafics résultants.....	13
3.4 - Structures	15
3.5 - Coûts	17
3.6 - Synthèse.....	21
Bibliographie	22
Glossaire.....	22
Annexes	24
Annexe A - Matériaux.....	24
Annexe B - Utilisation d'Alizé	25
Annexe C - Détail des coûts.....	33

Dans un contexte de transposition de la directive Eurovignette 2006/38/CE, la Direction Générale des Routes a demandé au Sétra d'étudier l'incidence du trafic des Poids Lourds sur les coûts de construction et d'entretien des routes afin de calculer des coefficients d'imputation des charges d'infrastructures routières entre différents usagers de la route, à savoir dans le cas présent les Véhicules Légers et les différents types de PL.

Ce rapport d'étude présente les résultats obtenus pour l'analyse de l'impact de la prise en compte du trafic PL sur les coûts de construction des chaussées. Il vient ainsi alimenter l'étude globale sur l'incidence du trafic PL sur les coûts des routes commandée.

Pour mettre en évidence le lien entre trafic PL et coût de construction et d'entretien des chaussées neuves, l'étude revient sur la doctrine française de dimensionnement des chaussées. Celle-ci met en effet en évidence le fait qu'il est possible de caractériser les PL au regard des dommages qu'ils engendrent sur une chaussée et inversement de dimensionner une chaussée en tenant compte finement du trafic qui est attendu.

Ensuite, le rapport détaille la démarche retenue, basée sur des simulations de chaussées dimensionnées pour accueillir différents trafics de PL et des estimations de coûts de construction de celles-ci, basées sur des observations réalisées par le Réseau Scientifique et Technique.

Enfin, il présente les résultats obtenus avec une synthèse présentant des "coefficients d'équivalence" qui permettent de quantifier l'incidence du trafic PL et de différents types de PL sur les coûts de construction des chaussées neuves.

Page laissée blanche intentionnellement

Incidence des PL sur les coûts de construction des chaussées neuves

Collection les rapports

Introduction

Dans un contexte de transposition de la directive Eurovignette [1], la Direction Générale des Routes a demandé au Sétra d'étudier l'incidence du trafic des Poids Lourds sur les coûts de construction et d'entretien des routes afin de calculer des coefficients d'imputation des charges d'infrastructures routières entre différents usagers de la route, à savoir dans le cas présent les Véhicules Légers et les différents types de PL.

Ce rapport d'étude présente les résultats obtenus pour l'analyse de l'impact de la prise en compte du trafic PL sur les coûts de construction des chaussées. Il vient ainsi alimenter l'étude globale sur l'incidence du trafic PL sur les coûts des routes commandée.

Pour mettre en évidence le lien entre trafic PL et coût de construction et d'entretien des chaussées neuves, l'étude revient sur la doctrine française de dimensionnement des chaussées. Celle-ci met en effet en évidence le fait qu'il est possible de caractériser les PL au regard des dommages qu'ils engendrent sur une chaussée et inversement de dimensionner une chaussée en tenant compte finement du trafic qui est attendu.

Ensuite, le rapport détaille la démarche retenue, basée sur des simulations de chaussées dimensionnées pour accueillir différents trafics de PL et des estimations de coûts de construction de celles-ci, basées sur des observations réalisées par le Réseau Scientifique et Technique.

Enfin, il présente les résultats obtenus avec une synthèse présentant des "coefficients d'équivalence" qui permettent de quantifier l'incidence du trafic PL et de différents types de PL sur les coûts de construction des chaussées neuves.

1 - Méthodologie de l'étude

Afin de mesurer l'impact de la présence de PL sur les coûts de construction des chaussées, il a fallu tout d'abord **établir le lien entre trafic PL et dimensionnement des structures de chaussées**. Or, les structures des chaussées françaises sont dimensionnées de manière à accepter un certain **dommage** créé par le trafic de PL (indépendamment du trafic VL) qu'elles supportent sur leur durée de vie. Ce dommage, causé par les PL qui circulent sur les chaussées, peut s'apprécier à partir de l'**agressivité** de ceux-ci. Ce critère d'agressivité est donc naturellement apparu comme un critère permettant de classer les PL au regard du dommage qu'ils causent aux chaussées et ainsi de définir des classes de PL d'agressivité homogène.

La définition de ces classes de PL a été la première étape de la présente étude. Ensuite, sur la base de ces résultats, différents scénarios ont été étudiés, dans lesquels on interdit dans un premier temps la circulation des PL, puis on autorise successivement la circulation de classes de PL de plus en plus agressifs, afin de mesurer l'impact de la présence de ces PL sur le dimensionnement des structures de chaussées. Enfin, les structures établies dans les différents scénarios ont été traduites en coûts afin de calculer l'impact du trafic PL sur les coûts de construction des chaussées.

Cette méthode est détaillée dans la première partie de ce rapport, réservée au rappel des fondements théoriques de cette analyse. La deuxième partie est quant à elle réservée aux résultats obtenus.

2 - Démarche adoptée

La démarche générale de cette étude repose sur la méthode française de dimensionnement des structures de chaussées, dont les fondements sont décrits dans le guide technique de conception et dimensionnement des structures de chaussées de 1994 [2]. Certaines des hypothèses prises ici sont cependant issues du catalogue des structures types de chaussées neuves de 1998 [3], qui tient compte des évolutions apparues entre temps.

Dans cette première partie, nous exposons les éléments théoriques sur lesquels s'appuie cette doctrine française : **agressivité** des véhicules et **dimensionnement** des structures de chaussées. Mais avant de rentrer dans ces questions de dimensionnement, nous rappelons pourquoi l'étude sur l'incidence du trafic de PL sur les coûts de construction des chaussées a nécessité de tels développements théoriques.

2.1 - Mesure de l'incidence du trafic PL sur les coûts de construction des chaussées neuves

Le coût d'une chaussée dépend de plusieurs facteurs : linéaire construit, environnement de la route, profil en travers, matériaux choisis ... La présence de PL dans la circulation attendue sur la chaussée peut jouer sur ces différents paramètres. Dans la présente étude, on a cherché à mesurer l'incidence de la présence de PL sur le facteur "structure" de chaussée, c'est-à-dire à déterminer le surcoût occasionné par la présence de différents types de PL en circulation sur la chaussée par rapport à une situation où seuls des VL (et quelques PL légers comme nous le verrons par la suite) seraient autorisés sur la route.

En première approche, il est apparu que les PL jouaient un rôle fondamental dans le dimensionnement des structures de chaussées, puisque la doctrine française en la matière préconise une méthode de dimensionnement de ces structures qui ne dépend que du trafic PL attendu sur la route.

Mais, la méthode française de dimensionnement telle qu'elle se présente dans les guides techniques du Sétra, bien qu'indiquant clairement que les PL sont responsables de surcoûts de construction des structures de chaussées, ne permet pas directement de déterminer quelle serait la structure d'une chaussée destinée à accueillir pas ou très peu de PL ou encore de mesurer la responsabilité individuelle et relative des différents types de PL en fonction de leur charge et de leur nombre d'essieux dans les choix finaux de dimensionnement.

Il a donc été décidé de revenir aux fondements de cette méthodologie de dimensionnement des structures. Pour ce faire, le réseau scientifique et technique (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et Laboratoires Régionaux) a été associé au groupe de travail du Sétra et une méthode d'analyse de l'incidence du trafic PL sur le dimensionnement des structures de chaussées a été établie.

Il a d'abord été d ecid e de caractériser les différents types de PL observ es sur les routes en France au regard du dommage qu'ils engendrent sur les chaussées : pour ce faire, on a utilis e la notion d'agressivité présentée dans le paragraphe suivant. Ces types de PL ont ensuite été regroup es dans trois classes de PL d'agressivité croissante (appelées classes 1, 2 et 3 par la suite) : cette définition des classes de trafic est donnée en deuxième partie sur les résultats obtenus. Enfin, des scénarios de dimensionnement ont été construits : le premier consiste à dimensionner une chaussée destinée à n'accueillir quasiment aucun PL, le deuxième à dimensionner une chaussée destinée à accueillir seulement les PL de la classe la moins agressive, le troisième à introduire sur cette chaussée à dimensionner les PL des deux classes les moins agressives et enfin le dernier à autoriser sur la chaussée tous les PL rencontr es en France. Dans ce dernier scénario, on dimensionne donc une "chaussée moyenne" française au regard du trafic réellement observ e en moyenne sur les routes françaises. Les résultats obtenus pour le dimensionnement de ces chaussées sont donn es dans la deuxième partie du rapport tandis que les principes du dimensionnement ainsi que l'ensemble des hypothèses nécessaires à ce travail sont d etaill es dans la première partie réservée à la théorie.

2.2 - Calculs d'agressivité

2.2.1 - La notion d'agressivité

L'agressivité d'un véhicule vis-à-vis d'une chaussée représente le rapport entre les dommages que celui-ci lui fait subir et ceux caus es par l'essieu de référence français. Rappelons d es à présent que l'agressivité d'un PL est sans commune mesure avec celle d'un VL, et que les chaussées françaises sont donc dimensionnées en fonction du trafic PL uniquement. En conséquence, on ne s'intéresse qu'aux dommages caus es par les PL. Ces dommages sont de différentes natures :

- Pour le support de la chaussée en matériaux non traités, chaque passage de PL induit une déformation verticale permanente ; l'accumulation de celles-ci se traduit en surface par une déformation de profil (orniérage à grand rayon) ;
- Pour la structure de chaussée, chaque passage de PL induit un fléchissement de celle-ci, ce qui donne lieu à des sollicitations (contrainte et déformation) en traction par flexion ; la répétition de celles-ci conduit à une accumulation de dommages par fatigue des couches traitées, ce qui provoque à terme la ruine de la chaussée.

Pour les chaussées à très faible trafic, a fortiori donc pour la chaussée fictive sans PL, ce sont les dommages au niveau du sol support qui sont dimensionnants. Pour les chaussées accueillant un trafic conséquent, ce sont dans la grande majorité des cas les dommages au sein de la structure en matériaux li es qui le sont.

2.2.2 - Paramètres déterminant l'agressivité d'un véhicule

L'agressivité d'un véhicule sur une chaussée est liée à sa silhouette et à sa charge. Pour connaître ces caractéristiques chez les PL circulant en France, on a utilis e les Stations d'Analyse du Trafic Lourd. Celles-ci permettent de connaître à la fois la charge et la silhouette des PL sond es au niveau des stations. Plus précisément, il est possible de distinguer les 11 catégories suivantes :

- PL1 : porteur à deux essieux,
- PL2 : porteur à trois essieux,
- PL3 : tracteur à deux essieux + semi-remorque à un essieu,
- PL4 : tracteur à deux essieux + semi-remorque à deux essieux,
- PL5 : tracteur à deux essieux + semi-remorque à trois essieux,
- PL6 : tracteur à trois essieux + semi-remorque à deux essieux,
- PL7 : porteur à deux essieux + remorque à deux essieux,

- PL8 : porteur à deux essieux + remorque à trois essieux,
- PL9 : porteur à trois essieux + remorque à deux essieux,
- PL10 : porteur à trois essieux + semi-remorque à trois essieux,
- PL11 : autres PL.

Pour calculer l'agressivité des PL sondés, on a considéré les onze catégories précédentes, chargées à leur Poids Total Autorisé en Charge (ou Poids Total Roulant Autorisé) possibles.

Essieu de référence

L'agressivité d'un essieu est une grandeur relative mesurée par rapport à celle d'un **essieu standard**. L'essieu standard est l'essieu de référence choisi en France pour déterminer les agressivités des différents essieux. Cet essieu est un essieu de 130 kN (environ 13 tonnes) monté en jumelage (32,5 kN par roue, pression de contact 0,662 MPa). Il est représentatif des charges les plus lourdes circulant sur le réseau routier français et correspond à la charge maximale autorisée pour un essieu simple par le code de la route.

Chaussées bitumineuses et semi-rigides

L'agressivité d'un PL est la somme des agressivités des essieux de celui-ci, calculées de la manière suivante :

$$A_i = \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_0} \right)^\alpha \text{ pour les chaussées bitumineuses,}$$

$$A_i = \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right)^\alpha \text{ pour les chaussées semi-rigides}$$

où :

A_i : agressivité de l'essieu simple i , **prenant en compte les effets des essieux environnant s'ils existent**

ε_i : déformation en traction par flexion à la base de la couche de fondation causée par l'essieu considéré i

ε_0 : déformation en traction par flexion à la base de la couche de fondation causée par l'essieu standard

σ_i : contrainte de traction par flexion à la base de l'une des couches d'assise causée par l'essieu considéré i

σ_0 : contrainte de traction par flexion à la base de l'une des couches d'assise causée par l'essieu standard

α : coefficient lié à la pente de fatigue des matériaux

= 5 en France pour les matériaux bitumineux

= 12 en France pour les matériaux traités aux liants hydrauliques

Remarque : dans les calculs d'agressivité par cette méthode, chaque essieu est considéré comme **faisant partie d'un ensemble d'essieux**, le calcul prend donc en compte **les effets des autres essieux de l'ensemble** ; l'agressivité d'un essieu isolé n'est par exemple pas la même que l'agressivité d'un essieu faisant partie d'un groupe d'essieux montés en tridem.

Pour calculer les agressivités des différents types de PL, il faut donc calculer les sollicitations créées à la base des couches des structures pour des chaussées types. Ces chaussées types sont définies dans les paragraphes suivants.

Les chaussées types

Le calcul de l'agressivité d'un PL dépendant du type de structure de la chaussée, il faut définir les chaussées types pour lesquelles on va effectuer ce calcul.

Chaussée souple

La terminologie "chaussée souple" désigne les structures comportant une couverture bitumineuse relativement mince, parmi lesquelles on retrouve les chaussées à très faible trafic (couche de roulement bitumineuse reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités).

Les calculs concernant la chaussée fictive "sans PL" sont menés séparément, puisque dans ce cas les vérifications portent sur des couches non liées (sol support). Le choix s'est porté sur le type de structure appelée chaussée souple, composée d'une couche de roulement de 4 cm en Béton Bitumineux posée sur des couches d'assise en Grave Non Traitée reposant sur le sol support. Dans cette étude, comme on le reverra plus tard, on a étudié deux cas de plates-formes possibles pour les chaussées accueillant des PL : les plates-formes de classe PF2 et les plates-formes de classe PF3. Pour le cas de la chaussée sans PL, on doit étendre au cas de la plate-forme de type PF1, qui d'ordinaire n'est pas accepté pour les chaussées du réseau routier national, mais tout simplement parce que jusqu'à présent un tel type de chaussée n'avait pas été envisagé. Ainsi, les structures utilisées pour les calculs d'agressivité pour la chaussée sans PL sont :

- Sur PF1 : 4 cm BB / 15 cm GNT2 / 15 cm GNT2 / PF1 ;
- Sur PF2 et PF3 : 4 cm BB / 15 GNT2 / PF2 ou PF3.

Les épaisseurs choisies sont représentatives des résultats que l'on obtiendra par le calcul, ce que l'on vérifiera bien par la suite, et ce afin d'obtenir des estimations d'agressivité les plus justes possibles.

Le PL de référence choisi pour dimensionner la chaussée sans PL est le PL1 chargé à 12 tonnes. Pour évaluer son agressivité vis-à-vis du sol support (c'est bien la sollicitation à la surface du sol support qui est l'élément dimensionnant dans le cas des chaussées souples à faible trafic), on va évaluer par simulation le dommage créé par le passage d'un certain nombre de ces PL sur une chaussée souple, et le comparer au dommage créé par le passage d'un même nombre d'essieux de référence, et ce pour chaque classe de plate-forme. Le rapport de ces deux résultats nous donnera l'agressivité du PL1 de 12 tonnes vis-à-vis du sol support de la chaussée, ce qui nous permettra de dimensionner la chaussée fictive.

Chaussées bitumineuses et semi-rigides

La terminologie "chaussée bitumineuse" est utilisée ici à la place de "chaussée bitumineuse épaisse". Elle désigne les structures se composant d'une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux traités aux liants hydrocarbonés.

La terminologie "chaussée semi-rigide" désigne les structures comportant une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques.

Ces deux types de chaussées sont présents en France. Pour choisir une chaussée type caractéristique des chaussées françaises accueillant du trafic PL, on utilise la base de données du Système d'Information sur la Connaissance du REseau routier national, qui renseigne sur les parts de chaque type de structure sur le Réseau Routier National. Celui-ci étant composé à 38% de chaussées bitumineuses et à 41% de chaussées semi-rigides, les chaussées types adoptées pour effectuer les calculs d'agressivité sont :

- pour les chaussées bitumineuses : 8 cm BB / 15 cm Grave Bitume / 15 cm GB / PF2 ;
- pour les chaussées semi-rigides : 8 cm BB / 25 cm Grave Ciment / 20 cm GC / PF2.

On se limitera à ces deux types de structures qui, d'après la base du SICRE restent les plus répandues.

Les calculs des sollicitations vont ainsi être effectués :

- à la base de la couche de fondation pour la chaussée bitumineuse ;
- à la base de la couche de base et de la couche de fondation pour la chaussée semi-rigide.

Les matériaux utilisés pour les calculs sont les matériaux sur lesquels les PL circulent actuellement, c'est-à-dire les matériaux considérés pour dimensionner les chaussées selon le catalogue des structures types de chaussées neuves de 1977 réactualisé en 1988 [4]. Ces hypothèses ont été validées par une exploitation de la base du SICRE.

2.2.3 - Évaluation des sollicitations

L'évaluation des sollicitations est réalisée à l'aide d'un logiciel qui simule numériquement les différentes couches de structure ainsi que l'empreinte des pneumatiques à la surface de celles-ci. C'est le logiciel Alizé du LCPC qui est choisi ici pour effectuer ces calculs (voir description succincte en annexe).

Le moteur de calcul de ce logiciel permet en effet la détermination des sollicitations (donc du dommage) créées par le trafic dans les différentes couches de matériaux constituant le corps de la chaussée. Il met en œuvre le modèle théorique de Burmister. Ce modèle s'appuie sur la modélisation mécanique de la structure par un massif semi-infini, constitué d'une superposition de couches de matériaux d'épaisseur constante, à comportement élastique linéaire isotrope.

Ce modèle est le fondement théorique de la doctrine de dimensionnement française et le logiciel Alizé (ici utilisé dans sa version la plus complète) a été implémenté dans une version opérationnelle pour dimensionner les routes du RRN français.

2.3 - Calculs de structures

Le dimensionnement d'une structure de chaussée est réalisé à partir de différentes hypothèses sur l'environnement de la route mais surtout à partir du trafic PL que la chaussée devra supporter pendant sa durée de vie. Ce trafic peut être caractérisé par son volume global et par son agressivité. Nous avons vu comment dans cette étude nous voulions prendre en compte les différentes agressivités des différents types de PL, nous allons maintenant exposer les hypothèses prises sur le volume global de PL considérés.

2.3.1 - Trafics considérés

Dans tout le texte, le trafic PL est donné en nombre de PL par jour et par sens sur la voie la plus chargée. C'est ce facteur qui est généralement utilisé pour le dimensionnement des chaussées.

2.3.2 - Sur la chaussée "sans PL"

La chaussée fictive "sans PL" accueillera des PL, contrairement à ce que l'on aurait pu penser, mais uniquement ceux nécessaires au bon fonctionnement de l'axe considéré (dépannage, nettoyage, chantiers d'entretien ...). L'hypothèse faite ici est reprise de l'étude de l'Union des Sociétés d'Autoroutes à Péage de juin 1992 [5], à savoir que la chaussée sans PL accueillera en moyenne deux PL par jour et par sens sur la voie la plus chargée.

2.3.3 - Sur les chaussées accueillant un trafic PL

Il a été décidé dans le cadre de cette étude de considérer un volume constant de PL (à savoir 2500 PL par jour et par sens sur la voie la plus chargée), quel que soit le scénario de dimensionnement considéré (sauf celui de la chaussée sans PL). Cette hypothèse permet de s'affranchir des effets de volume et de mesurer plus précisément l'incidence de chaque type de PL en fonction de sa classe d'agressivité sur le dimensionnement de la structure de chaussée.

La répartition entre types de PL est inspirée de celle observée actuellement sur le réseau routier national en moyenne au niveau des stations SATL :

Silhouette	Catégorie SATL	Part du trafic (%)	PTAC ou PTR A (T)
	PL1	17,0	7,5
	PL1	6,0	12
	PL1	5,3	19
	PL2	2,7	26
	PL3	1,3	26
	PL4	1,2	38
	PL5	48,3	40/44
	PL6	1,2	40/44
	PL7	1,3	38
	PL8	1,0	40/44
	PL9	0,6	40/44
	PL10	3,1	40/44
Autres PL	PL11	1,0	40/44

Remarque : lorsque deux PTAC ou PTR A sont possibles (à savoir 40 ou 44 tonnes), les calculs ont été effectués pour un poids total de 40 tonnes.

Afin d'effectuer des calculs de structures, nous devons définir deux notions : le trafic équivalent et le trafic cumulé.

2.3.4 - Notion de trafic équivalent

Afin de calculer une structure de chaussée capable d'accueillir un certain trafic, il faut d'abord convertir celui-ci en nombre équivalent d'essieux de référence, noté NE. La formule générale est la suivante :

$$NE = \sum_{PLi} A_i \times N_{PLi}$$

où :

N_{PLi} : nombre attendu de PLi sur la durée de vie de la chaussée, i allant de 1 à 11 (classification SATL)

A_i : agressivité du PLi

et :

$$N_{PLi} = \%_{PLi} \times 2500PL / \text{jour} / \text{sens}$$

Remarque : ces définitions diffèrent de celles du catalogue des structures types de chaussées neuves. Cela est dû au fait que le catalogue ne fait pas la distinction entre les différents types de PL, alors que cette distinction constitue précisément l'originalité de cette étude.

2.3.5 - Notion de trafic cumulé

Le Trafic Cumulé utilisé dans le cadre du dimensionnement des chaussées est le trafic PL que la chaussée va supporter sur la durée de vie pour laquelle elle est dimensionnée.

On reprend ici les hypothèses habituelles utilisées en France pour dimensionner les structures de chaussées des Voies du Réseau Structurant, à savoir une croissance arithmétique de 5% sur une durée de vie de 30 ans. Ceci donne pour le calcul du TC :

$$TC = NE \times 365 \text{ jours} \times \left(30 \text{ ans} + 5\% \times \frac{30 \text{ ans} \times (30 \text{ ans} - 1 \text{ an})}{2} \right)$$

2.3.6 - Calcul des structures

À partir du TC, en fonction des matériaux constituant la structure que l'on veut dimensionner et du risque choisi (selon le catalogue des structures types de chaussées neuves, toujours en fonction du TC), on va pouvoir définir une sollicitation admissible à la base de la couche dimensionnante (ou dans le sol support dans le cas de la chaussée sans PL).

Le logiciel de simulation numérique va alors nous permettre de déterminer les épaisseurs des différentes couches afin d'obtenir des sollicitations inférieures à la sollicitation admissible calculée. Cette méthode permet d'obtenir les structures présentées dans la deuxième partie réservée aux résultats pour les quatre scénarios de dimensionnement établis.

2.3.7 - Environnement – Données climatiques

La partie environnement - données climatiques est volontairement laissée de côté dans un souci de simplicité, mais il faut savoir que si elle était prise en compte, cela pourrait amener à augmenter les épaisseurs des structures de chaussées accueillant des PL, afin d'assurer une protection de ces structures de chaussées contre le gel, ce qui en augmenterait les coûts.

2.4 - Coûts des chaussées

Les coûts considérés dans cette étude tiennent compte :

- des structures de chaussées (corps de chaussée + Bande d'Arrêt d'Urgence + Terre-Plein Central) ;
- des plates-formes de chaussées.

La méthode pour estimer les coûts des structures repose sur des calculs de quantités de matériaux utilisés. Il s'agit de coûts Hors Taxes exprimés en €courants. Une fois ces quantités estimées, on leur applique des coûts unitaires issus de l'observatoire des techniques de chaussées (voir présentation en annexe). Il faut ensuite imputer les surcoûts observés d'un scénario à l'autre aux différents usagers (VL, PL des classes 1, 2 et 3). Les scénarios envisagés sont les suivants :

- Scénario 0 : quasiment aucun PL n'est autorisé à emprunter la chaussée, on dimensionne la chaussée "sans PL" mentionnée précédemment ;
- Scénario 1 : seuls les PL de la classe 1 sont autorisés à emprunter la chaussée ;
- Scénario 2 : seuls les PL des classes 1 et 2 sont autorisés à emprunter la chaussée ;
- Scénario 3 : tous les PL (donc des classes 1, 2 et 3) sont autorisés à emprunter la chaussée.

Pour chaque scénario, le nombre de PL total est identique. La part relative des différents types de PL est tirée des observations sur le trafic français.

Ce problème n'a pas de solution unique et simple (Emile Quinet, 1998 [6]). On propose ici de procéder comme suit :

- les surcoûts observés entre le scénario 2 et le scénario 3 sont imputés aux PL de la classe 3 uniquement ;
- les surcoûts observés entre le scénario 1 et le scénario 2 sont imputés aux PL des classes 2 et 3 au prorata des parts relatives de chaque classe dans le trafic observé sur les stations SATL (qui ont servi auparavant à construire les populations de chaque scénario) ;
- les surcoûts observés entre le scénario 0 et le scénario 1 sont imputés aux PL des 3 classes au prorata des parts relatives de chaque classe dans le trafic observé ;
- les coûts fixes calculés dans le scénario 0 sont répartis entre tous les usagers, PL et VL au prorata des parts relatives de chaque usager dans le trafic observé. On utilise pour répartir ces dépenses un coefficient d'équivalence PL/VL de 2,5 afin de tenir compte de l'encombrement relatif des deux types de véhicules. La

valeur de ce coefficient est celle utilisée dans les courbes temps-débit par défaut. Elle avait fait l'objet d'une expertise par l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (Inrets) dans l'étude de l'USAP [5].

Cette méthode d'imputation a été retenue après différents tests. Elle permet de tenir compte du fait que le surdimensionnement à l'introduction d'une nouvelle classe de PL bénéficie également aux classes qui sont introduites dans les scénarios qui suivent.

Pour les trafics VL et PL, on considère que le trafic PL est de 2500 PL/jour/sens afin de garder les mêmes hypothèses que pour le calcul des coûts de construction des chaussées (cela suppose de considérer que le trafic total par sens est égal au trafic sur la voie la plus chargée). Chaque classe de PL est représentée avec une part du trafic PL correspondant à celle observée sur le RRN. Le trafic VL est choisi de sorte à ce que la part des PL dans le trafic global soit de 12% puisqu'il s'agit de la part réellement observée sur le RRN d'après le dernier sondage de circulation de 2004. Cette méthode d'imputation des coûts communs à chaque classe au prorata des parts de trafic (ou des vkm si on raisonne sur des coûts globaux) respecte la directive Eurovignette qui demande que "les péages moyens pondérés [soient] liés aux coûts de construction et aux coûts d'exploitation, d'entretien et de développement du réseau d'infrastructure concerné".

2.4.1 - Couches de structure

Afin d'évaluer les coûts des structures de chaussées dimensionnées, on a procédé de la manière suivante : les quantités de matériaux nécessaires ont été calculées en fonction de la géométrie des chaussées, ces quantités ont ensuite été multipliées par les coûts unitaires moyens de ces matériaux. Ces coûts unitaires sont issus de l'action "suivi du coût des techniques", menée par le Sétra, et présentée en annexe.

2.4.2 - Plate-forme

Les calculs des quantités de matériaux pour réaliser les couches de forme reposent sur une application directe du guide technique de réalisation des remblais et couches de forme [9]. Ces calculs ont été réalisés dans le cadre d'une mise en œuvre pour les couples partie supérieure du terrassement- arase de classe PST3-AR1 et PST3-AR2, avec différentes techniques (apport de matériaux granulaires ou traitement en place).

3 - Résultats

3.1 - Agressivité

Le détail des calculs d'agressivité est donné en annexe. Nous ne reportons dans cette partie que les principaux résultats.

3.1.1 - Chaussée "sans PL"

Les calculs d'agressivité en fonction de la plate-forme support donnent les résultats suivants :

Type de PL	Part du trafic PL (%)	Intensité du trafic (N _{PL})	Plate-forme	Agressivité
PL1 < 12 t 	100	2	PF1	0,14
			PF2	0,16
			PF3	0,17

3.1.2 - Chaussées bitumineuses et semi-rigides

Le tableau ci-après fournit les agressivités des PL en fonction de leur type et de la structure de chaussée considérée.

Silhouette	Catégorie SATL	Part du trafic PL (%)	Agressivité (bitumineuse)	Agressivité (semi-rigide)
	PL1	17	0,01	$1,08 \times 10^{-5}$
	PL1	6	0,10	$0,32 \times 10^{-2}$
	PL1	5,3	0,74	0,36
	PL2	2,7	0,55	0,34
	PL3	1,3	0,49	0,05
	PL4	11,2	0,99	0,41
	PL5	48,3	1,80	0,66
	PL6	1,2	0,56	0,18
	PL7	1,3	0,93	0,17
	PL8	1,0	0,62	0,10
	PL9	0,6	0,49	0,09
	PL10	3,1	0,20	0,02
Autres PL	PL11	1,0	0,8(*)	1,3(*)
Moyenne	Trafic "réel"	100	1,09	0,41

(*) en l'absence de données, valeurs du catalogue

Remarque : la forte différence d'agressivité que l'on peut observer entre les PL5 et les autres silhouettes provient de la présence du tridem à pneus simples sur la remorque. Le calcul montre en effet que les configurations à pneus simples sont toujours plus agressives, et de loin, que celles comportant une majorité de pneus jumelés.

Le scénario 3 correspond à la répartition du trafic observé sur le RRN. Si l'on compare l'agressivité moyenne calculée, on constate que, dans le cas des chaussées bitumineuses, elle est supérieure à l'hypothèse du catalogue (on obtient 1,09 par le calcul, le catalogue propose 0,8). Si l'on tient compte du fait que les PL du scénario 3 sont tous chargés à leur PTAC ou PTRR (alors que ce n'est pas le cas dans la réalité), alors ce résultat est tout à fait satisfaisant, et on va pouvoir mener les calculs de structures avec les hypothèses classiques du catalogue (choix de la couche de surface et du risque de calcul en particulier). Par contre, pour les chaussées semi-rigides, la valeur obtenue pour l'agressivité moyenne calculée est inférieure à la valeur proposée dans le catalogue (0,41 calculée pour 1,3 proposée). Or la démarche française de dimensionnement constitue un ensemble cohérent (les calculs analytiques recalés par rapport au comportement de chaussées réelles), on ne peut donc pas poursuivre les calculs de structures semi-rigides sans effectuer une correction (cela traduit le fait que la méthode adoptée dans cette étude, qui est adaptée au cas des chaussées bitumineuses, ne l'est pas au cas des structures semi-rigides à moins d'introduire une correction). On a donc choisi, dans le cadre de cette étude, de recalculer le cas des chaussées semi-rigides par rapport à la valeur du catalogue, en l'ajustant à l'aide des résultats obtenus sur chaussées bitumineuses. On obtient alors les résultats présentés dans le tableau suivant :

Silhouette	Catégorie SATL	Part du trafic PL (%)	Agressivité (bitumineuse)	Agressivité corrigée (semi-rigide)
	PL1	17,0	0,01	$3,53E^{-5}$
	PL1	6,0	0,10	0,01
	PL1	5,3	0,74	1,08
	PL2	2,7	0,55	0,53
	PL3	1,3	0,49	0,40
	PL4	11,2	0,99	2,17
	PL5	48,3	1,80	9,10
	PL6	1,2	0,56	0,55
	PL7	1,3	0,93	1,87
	PL8	1,0	0,62	0,71
	PL9	0,6	0,49	0,40
	PL10	3,1	0,20	0,05
Autres PL	PL11	1,0	0,80	1,30
Moyenne	Trafic "réel"	100	1,09	4,77

3.2 - Classement des PL

A ce stade, on souhaite regrouper les PL en classes homogènes d'agressivité. A la lecture du tableau précédent, on obtient le résultat suivant :

- Classe 1 : PL1 < 7,5t + PL1 < 12t ;
- Classe 2 : autres PL1 + PL2 + PL3 + PL6 + PL8 + PL9 + PL10 ;
- Classe 3 : PL4 + PL5 + PL7 + PL11.

Une variante a également été étudiée, dans laquelle les PL sont regroupés dans 3 classes en fonction de leur nombre d'essieux et de contraintes de poids :

- Classe 1 : PL1 < 7,5t + PL1 < 12t ;
- Classe 2bis : autres PL1 + PL2 + PL3 ;
- Classe 3bis : PL4 + PL5 + PL6 + PL7 + PL8 + PL9 + PL10 + PL11.

Cette deuxième classification place les PL de type PL6, PL8, PL9 et PL10 dans une classe plus agressive. On souhaite toutefois étudier cette variante qui permettrait, dans une phase ultérieure d'utilisation des résultats pour une politique de tarification routière, d'établir des grilles tarifaires en fonction du nombre d'essieux essentiellement (sauf pour les PL à deux essieux) proches de celles observées actuellement sur les autoroutes concédées ou sur les systèmes européens voisins.

3.3 - Trafics résultants

À partir des éléments précédents, voici les trafics qui vont être pris en compte pour dimensionner les différents types de structures.

3.3.1 - Chaussée souple sans PL – Scénario 0

Scénario 0 :

Type de PL	Part du trafic PL (%)	Intensité du trafic (N _{PL})	Plate-forme	Agressivité	NE	Trafic cumulé (x10 ³)
PL1 < 12	100	2	PF1	0,14	0,28	3,06
			PF2	0,16	0,32	3,50
			PF3	0,17	0,34	3,72

3.3.2 - Chaussées bitumineuses

Scénario 1 :

Type de PL	Classe PL	Part du trafic (%)	Intensité du trafic (N _{PL})	Agressivité	NE	Trafic cumulé (x10 ⁶)
PL1 < 7,5t	1	73,9	1848	0,01	18,48	0,35
PL1 < 12t	1	26,1	652	0,10	65,23	1,23
Total	-	100	2500	0,03	83,70	1,58

Scénario 2 :

Type de PL	Classe PL	Part du trafic (%)	Intensité du trafic (N _{PL})	Agressivité	NE	Trafic cumulé (x10 ⁶)
PL1 < 7,5t	1	44,5	1113	0,01	11,1	0,21
PL1 < 12t	1	15,7	393	0,10	39,3	0,74
PL1 < 19t	2	13,9	347	0,74	256,7	4,85
PL2	2	7,1	177	0,55	97,2	1,84
PL3	2	3,4	85	0,49	41,7	0,79
PL6	2	3,1	79	0,56	44,0	0,83

PL8	2	2,6	65	0,62	40,6	0,77
PL9	2	1,6	39	0,49	19,2	0,36
PL10	2	8,1	203	0,20	40,6	0,77
Total	-	100	2500	0,24	590,3	11,15

Scénario 2bis :

Type de PL	Classe PL	Part du trafic (%)	Intensité du trafic (N _{PL})	Agressivité	NE	Trafic cumulé (x10 ⁶)
PL1 < 7,5t	1	52,6	1315	0,01	13,2	0,25
PL1 < 12t	1	18,6	465	0,10	46,5	0,88
PL1 < 19t	2bis	16,4	410	0,74	303,4	5,73
PL2	2bis	8,4	209	0,55	115,0	2,17
PL3	2bis	4,0	101	0,49	49,2	0,93
Total	-	100	2500	0,21	525,2	9,96

Scénario 3 :

Type de PL	Classe PL	Part du trafic (%)	Intensité du trafic (N _{PL})	Agressivité	NE	Trafic cumulé (x10 ⁶)
PL1 < 7,5t	1	17,0	425	0,01	4,3	0,08
PL1 < 12t	1	6,0	150	0,10	15,0	0,28
PL1 < 19t	2 ou 2bis	5,3	133	0,74	98,1	1,85
PL2	2 ou 2bis	2,7	68	0,55	39,8	0,70
PL3	2 ou 2 bis	1,3	33	0,49	15,93	0,30
PL4	3 ou 3bis	11,2	280	0,99	277,2	5,24
PL5	3 ou 3bis	48,3	1208	1,80	2173,5	41,05
PL6	2 ou 3bis	1,2	30	0,56	16,8	0,32
PL7	3 ou 3bis	1,3	33	0,93	30,2	0,57
PL8	2 ou 3bis	1,0	25	0,62	15,5	0,29
PL9	2 ou 3bis	0,6	15	0,49	7,4	0,14
PL10	2 ou 3bis	3,1	78	0,20	15,5	0,29
PL11	3 ou 3bis	1,0	25	0,80 (*)	20,0	0,38
Total	-	100	2500	1,09	2731,4	51,50

(*) : en l'absence de données, valeur du catalogue de 1998

3.3.3 - Chaussées semi-rigides

Scénario 1 :

Type de PL	Classe PL	Part du trafic (%)	Intensité du trafic (N _{PL})	Agressivité	NE	Trafic cumulé (x10 ⁶)
PL1 < 7,5t	1	73,9	1848	0,00	0,0	0,00
PL1 < 12t	1	26,1	652	0,01	5,8	0,11
Total	-	100	2500	0,00	5,8	0,11

Scénario 2 :

Type de PL	Classe PL	Part du trafic (%)	Intensité du trafic (N _{PL})	Agressivité	NE	Trafic cumulé (x10 ⁶)
PL1 < 7,5t	1	44,5	1113	0,00	0,0	0,00
PL1 < 12t	1	15,7	393	0,01	3,5	0,07
PL1 < 19t	2	13,9	347	1,08	374,0	7,06
PL2	2	7,1	177	0,53	93,5	1,77
PL3	2	3,4	85	0,40	34,1	0,64
PL6	2	3,1	79	0,55	43,4	0,82
PL8	2	2,6	65	0,71	46,1	0,87
PL9	2	1,6	39	0,40	15,7	0,30
PL10	2	8,1	203	0,05	9,5	0,18
Total	-	100	2500	0,25	619,8	11,71

Scénario 2bis :

Type de PL	Classe PL	Part du trafic (%)	Intensité du trafic (N _{PL})	Agressivité	NE	Trafic cumulé (x10 ⁶)
PL1 < 7.5t	1	52,6	1315	0,00	0,0	0,00
PL1 < 12t	1	18,6	465	0,01	4,1	0,08
PL1 < 19t	2bis	16,4	410	1,08	442,0	8,35
PL2	2bis	8,4	209	0,53	110,5	2,09
PL3	2bis	4,0	101	0,40	40,3	0,76
Total	-	100	2500	0,24	597,0	11,28

Scénario 3 :

Type de PL	Classe PL	Part du trafic (%)	Intensité du trafic (N _{PL})	Agressivité	NE	Trafic cumulé (x10 ⁶)
PL1 < 7.5t	1	17,0	425	3,53E ⁻⁵	0,0	0,00
PL1 < 12t	1	6,0	150	0,01	1,3	0,03
PL1 < 19t	2 ou 2bis	5,3	133	1,08	142,9	2,70
PL2	2 ou 2bis	2,7	68	0,53	35,7	0,67
PL3	2 ou 2 bis	1,3	33	0,40	13,0	0,25
PL4	3 ou 3bis	11,2	280	2,17	607,0	11,47
PL5	3 ou 3bis	48,3	1208	9,10	10991,8	207,62
PL6	2 ou 3bis	1,2	30	0,55	16,6	0,31
PL7	3 ou 3bis	1,3	33	1,87	60,6	1,15
PL8	2 ou 3bis	1,0	25	0,71	17,6	0,33
PL9	2 ou 3bis	0,6	15	0,40	6,0	0,11
PL10	2 ou 3bis	3,1	78	0,05	3,6	0,07
PL11	3 ou 3bis	1,0	25	1,30 ^(*)	32,5	0,61
Total	-	100	2500	4,77	11928,7	225,32

(*) : en l'absence de données, valeur du catalogue de 1998

3.3.4 - Synthèse (chaussées avec PL)

Le tableau suivant fait la synthèse des résultats présentés dans les précédents en termes de trafic cumulé considéré dans chaque scénario.

Scénario	Trafic cumulé (x10 ⁶)	
	Chaussées bitumineuses	Chaussées semi-rigides
1	1,58	0,11
2	11,15	11,71
2bis	9,96	11,28
3	51,50	225,32

3.4 - Structures

Les calculs des structures sont effectués pour deux situations : pour les plates-formes de classe de portance PF2 et pour les plates-formes de classe de portance PF3. Les épaisseurs de couches de roulement et les risques de calcul R ont été choisis en fonction des hypothèses du catalogue des structures types de chaussées neuves de 1998, c'est-à-dire en fonction du trafic cumulé.

Il faut savoir qu'au-dessus d'un certain niveau de trafic, le catalogue des structures types de chaussées neuves n'autorise pas de construire sur des plates-formes de classe PF2. Il s'agit cependant ici d'évaluer la part de responsabilité relative des différents types de PL dans les coûts de construction des chaussées neuves. Dans ce cadre, l'exercice reste intéressant et pertinent.

3.4.1 - Chaussée sans PL

On arrive en fait au minimum technologique pour les classes de plates-formes PF2 et PF3, ce qui nous a amené à envisager un dimensionnement supplémentaire pour la chaussée sans PL, à savoir le dimensionnement pour une classe de portance PF1 :

Sollicitation admissible (ϵ_z , en $\mu\text{déf}$)	Épaisseur de matériaux (cm)	Sollicitation admissible (ϵ_z , en $\mu\text{déf}$)	Épaisseur de matériaux (cm)	Sollicitation admissible (ϵ_z , en $\mu\text{déf}$)	Épaisseur de matériaux (cm)
2692	4 BB 15 GNT2 (Base) 10 ^(*) /15 ^(**) GNT2 (Fondation) PF1	2614	4 BB 12 ^(*) /15 ^(**) GNT2 PF2	2579	4 BB 4 ^(*) /15 ^(**) GNT2 PF3

(*) : épaisseur calculée

(**) : minimum technologique

Remarque : pour la structure sur plate-forme de classe PF1, la séparation de la couche d'assise en deux couches (base et fondation) n'est pas artificielle : elle rend compte des différences de caractéristiques de la GNT en fonction de sa position dans la structure.

3.4.2 - Chaussées bitumineuses

Pour les chaussées bitumineuses, les méthodes de dimensionnement conduisent à retenir des structures du type de celles mentionnées dans le tableau suivant.

Hypothèses	Plate-forme PF2		Plate-forme PF3	
	Sollicitation admissible (ϵ_t , en $\mu\text{déf}$)	Épaisseur de matériaux (cm)	Sollicitation admissible (ϵ_t , en $\mu\text{déf}$)	Épaisseur de matériaux (cm)
Scénario 1 R=18%	94,6	6 BB 20 GB3	104	6 BB 15 GB3
Scénario 2 R=5%	56,2	8 BB 28 GB3	61,8	8 BB 22 GB3
Scénario 2bis R=5%	57,5	8 BB 27 GB3	63,2	8 BB 22 GB3
Scénario 3 R=1%	36,6	8 BB 37 GB3	40,2	8 BB 31 GB3

3.4.3 - Chaussées semi-rigides

Pour les chaussées semi-rigides, les méthodes de dimensionnement conduisent à retenir des structures du type de celles mentionnées dans le tableau suivant.

Hypothèses	Plate-forme PF2		Plate-forme PF3	
	Sollicitation admissible (σ_t , en MPa)	Épaisseur de matériaux (cm)	Sollicitation admissible (σ_t , en MPa)	Épaisseur de matériaux (cm)
Scénario 1 R=17%	0,908	6 BB 29 GC3	0,999	6 BB 24 GC3
Scénario 2 R=5%	0,635 0,577	8 BB 22 GC3 20 GC3	0,635	8 BB 32 GC3
Scénario 2bis R=5%	0,636 0,578	8 BB 22 GC3 20 GC3	0,636	8 BB 32 GC3
Scénario 3		14 BB		14 BB

R=1%	0,453	25 GC3	0,453	20 GC3
	0,412	20 GC3	0,453	18 GC3

3.5 - Coûts

Les coûts indiqués dans ce rapport sont les coûts de matériaux 2006 HT (moyenne nationale hors région parisienne) hors mise en œuvre.

3.5.1 - Coûts des chaussées

Les coûts des chaussées (corps de chaussées plus BAU plus TPC) tiennent uniquement compte des quantités de matériaux utilisés. Le principe est donc de calculer les quantités de matériaux nécessaires en fonction d'un profil en travers type pour une chaussée à 2x2 voies avec TPC et BAU.

Les données constructives et le détail des cubatures sont précisés en annexe.

Chaussée sans PL

Coûts de la chaussée sans PL (k€HT/km)					
PF1		PF2		PF3	
Minimum technologique	Calculée	Minimum technologique	Calculée	Minimum technologique	Calculée
185,75	170,41	139,98	129,31	139,98	101,06

Chaussées avec PL

Plate-forme	Coûts des chaussées bitumineuses (k€HT/km)		Coûts des chaussées semi-rigides (k€HT/km)	
	PF2	PF3	PF2	PF3
Scénario 1	558,14	475,09	515,55	463,08
Scénario 2	742,45	629,56	702,90	590,14
Scénario 2bis	723,67	629,56	702,90	590,14
Scénario 3	920,33	806,13	864,37	789,79

3.5.2 - Prise en compte des plates-formes

L'incidence économique pour passer d'une plate-forme PF2 à PF3 est évaluée sur la base des éléments définis ci-dessous :

Les éléments techniques :

La couche de forme est mise en œuvre sur deux classes de PST-AR : PST3-AR1 et PST3-AR2, (les dispositions techniques liées au reclassement éventuel d'arase ne sont pas prises en compte).

La nature des matériaux de couche de forme correspond :

- à un matériau granulaire D21 ou D31 conforme à NF P 11-300 [7],
- à un sol fin traité chaux ciment (LTCC) de classe mécanique 5.

Les épaisseurs de la couche de forme, selon la nature des matériaux, sont celles préconisées par le guide technique de réalisation des remblais et des couches de formes (GTR ; épaisseurs préconisées pour assurer un objectif de portance sans prise en compte de l'aspect gel/dégel).

Pour les matériaux granulaires en couche de forme, l'interposition d'un géotextile à l'interface PST couche de forme permet une réduction d'épaisseur de 10 cm de la couche de forme pour une épaisseur préconisée inférieure à 50 cm ou 15 cm pour une épaisseur préconisée supérieure à 50 cm.

A partir de la combinaison des différents éléments évoqués, le tableau suivant donne les épaisseurs préconisées (en cm) de matériaux de couche de forme pour un objectif de plate-forme PF2 et PF3.

	PST3-AR1		PST3-AR2	
	Matériaux D21 ou D31	LTCC	Matériaux D21 ou D31	LTCC
PF2	(40) 30	35	(30) 20	-
PF3	(80) 65 (*)	50 (*)	(50) 40 (*)	35
Écart PF2 / PF3	+ 35 cm	+ 15 cm	+ 20 cm	+ 35 cm

(*) application des règles de sur-classement de portance des plates-formes (cf. GTR fasc. 1 § 3.4.2 [8])

Les éléments économiques :

Les coûts proposés sont extraits de la synthèse nationale des prix de terrassements établie à partir des marchés de travaux 2006.

Rappel des coûts :

- Couche de forme granulaire :
 - fourniture et mise en œuvre de matériaux D21 ou D31 en couche de forme : 20,71 €HT / m³,
 - fourniture et mise en œuvre de géotextile : 1,30 €HT / m².
- Couche de forme traitée :
 - extraction, transport, régalaage de déblais en couche de forme, toutes les opérations de traitement en place à la chaux (1%) et au liant hydraulique routier (6%) y compris fourniture des produits de traitement : 18,76 € HT / m³,
 - enduit de protection de la couche de forme : 0,94 €HT / m².

Évaluation économique du passage de PF2 à PF3 (coûts en €HT/m²)

	PST3-AR1		PST3-AR2	
	Matériaux D21 ou D31	LTCC	Matériaux D21 ou D31	LTCC
Épaisseur pour PF2 (cm)	30	35	20	-
Coût au m² (PF2)	7,50	7,50	5,45	-
Épaisseur pour PF3 (cm)	65	50	40	35
Coût au m² (PF3)	14,75	10,35	9,60	7,50
Écart PF2 / PF3 (cm)	+ 35	+ 15	+ 20	+ 35
Écart de coût au m²*	7,25	2,85	4,15	7,50

* les coûts ne tiennent pas compte de l'incidence sur les terrassements. Elle se traduit par une augmentation des déblais et une diminution des remblais.

Incidence économique sur les terrassements

Dans les zones en déblais, il est considéré que les déblais supplémentaires sont mis en œuvre en remblai sans traitement. Dans les zones en remblais, il est considéré que les remblais sont constitués de déblais mis en œuvre sans traitement.

Le prix d'extraction, transport et mise en œuvre de déblais en remblai est 4,91 €HT/m³.

PST3-AR1	PST3-AR2
----------	----------

	Matériaux D21 ou D31	LTCC	Matériaux D21 ou D31	LTCC
Épaisseur pour PF2	30 cm	35 cm	20 cm	-
Épaisseur pour PF3	65 cm	50 cm	40 cm	35 cm
Écart PF2 / PF3	+ 35 cm	+ 15 cm	+ 20 cm	+ 35 cm
Incidence au m ² sur terrassements	1,70 €HT/m ²	0,7 €HT/m ²	1,0 €HT/m ²	1,7 €HT/m ²
Coût au m ² Zones en déblais	8,95 €HT/m ²	3,6 €HT/m ²	5,1 €HT/m ²	9,2 €HT/m ²
Coût au m ² Zones en remblais	5,5 €HT/m ²	2,1 €HT/m ²	4,1 €HT/m ²	5,8 €HT/m ²

En résumé :

	Apport de matériaux granulaires		Traitement à la chaux et au ciment	
	Épaisseur (cm)	Coût (€HT/m ²)	Épaisseur (cm)	Coût (€HT/m ²)
PF2	AR2 : 20 AR1 : 30	5,45 7,50	- AR1 : 35	7,50
PF3	AR2 : 40 AR1 : 65	9,60 14,75	AR2 : 35 AR1 : 50	7,50 10,35

Coût de construction des chaussées de chaque scénario :

Finalement, en faisant la synthèse des informations sur les structures de chaussées et plates-formes, on aboutit à l'évaluation du coût des chaussées de chacun des scénarios.

Pour les plates-formes, on considère une largeur de 19,5 mètres pour la chaussée sans PL conformément aux conclusions du groupe de travail sur les caractéristiques techniques des autoroutes réservées aux seuls VL (décembre 1998) et 25 mètres pour les chaussées avec PL, conformément à l'Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Autoroutes de Liaison (ICTAAL) [10]. Le détail du profil en travers envisagé dans chacun des scénarios sans et avec PL est fourni dans l'annexe sur le détail des coûts.

Coût de la chaussée sans PL (k€HT / km)					
PF1 (pas besoin de plate-forme ^(*))		Traitement pour PF2		Traitement pour PF3	
Min. technologique	Calculé	Min. technologique	Calculé	Min. technologique	Calculé
185,64	171,28	AR2 : 249,84 AR1 : 289,81	AR2 : 242,31 AR1 : 282,28	AR2 : 302,76 AR1 : 380,76	AR2 : 274,6 AR1 : 352,6

^(*) : l'étude considère des conditions PST-AR données, avec au minimum la classe PST3-AR1, or obtenir une plate-forme de classe PF1 revient à atteindre la classe AR1

Plate-forme	Coûts des chaussées bitumineuses (k€HT/km) : chaussée + plate-forme		Coûts des chaussées semi-rigides (k€HT/km) : chaussée + plate-forme	
	PF2	PF3	PF2	PF3
Scénario 1	AR2 : 688,84 AR1 : 754,64	AR2 : 688,84 AR1 : 788,84	AR2 : 651,80 AR1 : 703,05	AR2 : 676,83 AR1 : 776,83
Scénario 2	AR2 : 878,70 AR1 : 929,95	AR2 : 843,31 AR1 : 943,31	AR2 : 839,15 AR1 : 890,40	AR2 : 803,89 AR1 : 903,89
Scénario 2bis	AR2 : 859,92 AR1 : 911,17	AR2 : 843,31 AR1 : 943,31	AR2 : 839,15 AR1 : 890,40	AR2 : 803,89 AR1 : 903,89
Scénario 3	AR2 : 1056,58 AR1 : 1107,83	AR2 : 1019,88 AR1 : 1119,88	AR2 : 1000,62 AR1 : 1051,87	AR2 : 1003,54 AR1 : 1103,54

De manière générale, on constate que le coût de l'ensemble plate-forme – couches de chaussées suit la tendance suivante : plus le trafic est intense (en nombre et en agressivité des PL), plus l'utilisation de plates-formes de performances élevées devient intéressante. Ce constat est rassurant car l'amélioration des plates-formes est préconisée dans le cas de fort trafic justement pour limiter les coûts de construction tout en conservant les performances globales de l'ensemble plate-forme plus structure. Il y a des exceptions, mais elles peuvent être liées au nombre de couches à mettre en œuvre et au fait que l'on n'a pas comparé différents matériaux au sein des grandes familles (on a utilisé la GB3 pour les structures bitumineuses, et la GC3 pour les structures semi-rigides).

3.6 - Synthèse

3.6.1 - Coût des différents scénarios

En prenant des valeurs moyennes en fonction du type d'arase, et en optimisant le coût plate-forme -structure, on arrive finalement aux résultats suivants :

	Chaussée sans PL (k€HT/km)	
	Structure calculée (plate-forme + structure)	Minimum technologique (plate-forme+structure)
Scénario 0	171,28 (0 + 171,28)	185,64 (0 + 185,64)
	Chaussés avec PL (k€HT/km)	
	Chaussées bitumineuses (plate-forme + structure)	Chaussées semi-rigides (plate-forme + structure)
Scénario 1	720,02 (161,88 + 558,14)	677,43 (161,88 + 515,55)
Scénario 2	893,31 (263,75 + 629,56)	853,89 (263,75 + 590,14)
Scénario 2bis	885,55 (161,88 + 723,67)	853,89 (263,75 + 590,14)
Scénario 3	1069,88 (263,75 + 806,13)	1026,25 (161,88 + 864,37)

3.6.2 - Imputation aux différentes classes de PL

La mise en œuvre de la méthode d'imputation présentée au paragraphe sur les coûts des chaussées permet d'arriver à deux types d'indicateurs :

- les sommes imputées globalement à chaque classe d'usager,
- les coefficients d'équivalence pour chaque classe, égaux au ratio entre le coût à supporter pour chaque usager de la classe considérée par rapport au coût à supporter pour chaque usager de la classe 0, c'est-à-dire un VL.

Finalement, on aboutit aux résultats suivants :

Chaussées bitumineuses (avec Scénario 2)

Classe Véhicule	VL (classe 0)	PL de classe 1	PL de classe 2	PL de classe 3
Coût imputé (k€2006 HT)	128	136	123	683
Coefficient d'équivalence	1	34	47	63

Chaussées bitumineuses (avec Scénario 2bis)

Classe Véhicule	VL (classe 0)	PL de classe 1	PL de classe 2	PL de classe 3
Coût imputé	128	136	75	731
Coefficient d'équivalence	1	34	46	62

Chaussées souples (avec Scénario 2)

Classe Véhicule	VL (classe 0)	PL de classe 1	PL de classe 2	PL de classe 3
Coût imputé	138	123	115	649
Coefficient d'équivalence	1	29	40	55

Chaussées souples (avec Scénario 2bis)

Classe Véhicule	VL (classe 0)	PL de classe 1	PL de classe 2	PL de classe 3
Coût imputé	138	124	71	692
Coefficient d'équivalence	1	29	41	54

On remarquera que les résultats sont assez peu sensibles au changement de nomenclature de la classe 2 à la classe 2bis.

Par ailleurs, différentes méthodes ont été testées pour imputer ces charges d'infrastructure, traditionnellement considérées comme des coûts fixes [11]. Finalement, la méthode ici proposée a été jugée satisfaisante.

Bibliographie

- [1] Directive 2006/38/CE du Parlement Européen et du Conseil du 17 mai 2006 modifiant la Directive 1999/62/CE relative à la taxation des poids lourds pour l'utilisation de certaines infrastructures
- [2] Conception et dimensionnement des structures de chaussées. *Guide technique*. Sétra, LCPC, 1994, 266 p. (référence Sétra : D9511)
- [3] Catalogue des structures types de chaussées neuves. *Guide technique*. Sétra, LCPC, 1998, 304 p. (référence Sétra : D9828)
- [4] Structures types de chaussées neuves (catalogue 1977 et actualisation 1988). *Guide technique*. Sétra, LCPC, 1977, 141 p.
- [5] Incidence du trafic poids lourds sur les coûts de construction et d'exploitation des autoroutes. USAP, 1992, 40 p.
- [6] Principes d'économie des transports. Emile Quinet, Economica, 1998, 419 p
- [7] NF P 11-300 Septembre 1992 – Exécution des terrassements – Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières
- [8] Réalisation des remblais et couches de forme. Fascicule 1 : principes généraux
- [9] Réalisation des remblais et couches de forme. *Guide technique*. Sétra, LCPC, 2000, 204 p. (référence Sétra : D92333)
- [10] ICTAAL - Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison. *Circulaire*. 12 décembre 2000
- [11] Applying the Eurovignette directive for infrastructure costs allocation in France. *Article publié par l'European Transport Conference 2008*, P. Cousin <http://www.etcproceedings.org/>.
- [12] Conception et dimensionnement des structures de chaussées. *Guide technique*. Sétra, LCPC, 1994. 266 p.

Glossaire

ARi : Arase de terrassement de classe i (voir PFi)

BAU : Bande d'Arrêt d'Urgence

BDG : Bande Dérasée de Gauche

BB : Béton Bitumineux

BBS : Béton Bitumineux pour chaussées Souples à faible trafic

CAM : Coefficient d'Agressivité Moyen

Couches de chaussées, dans l'ordre de profondeur croissante :

- Couche de surface :
 - ❖ Couche de roulement ;
 - ❖ Couche de liaison ;
- Couche d'assise :
 - ❖ Couche de base ;
 - ❖ Couche de fondation.

DGR : Direction Générale des Routes

Domage : grandeur sans unité qui représente la proportion du capital de fatigue qui a été consommée sous une contrainte

GBi : Grave Bitume de classe i

GCi : Grave Ciment de classe i

GNTi : Grave Non Traitée de classe i

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

NE : Nombre Équivalent d'essieux standards

N_{PL} : Nombre de PL

PFi : Plate-Forme de classe de performance PFi ; elle est constituée :

- du sol support, désigné dans sa zone supérieure (sur 1 m d'épaisseur environ) par le terme partie supérieure des terrassements (PST), et dont la surface constitue l'arase de terrassement ;
- d'une couche de forme éventuelle.

PL : Poids Lourd au sens de la norme NF P 98082, à savoir véhicule de plus de 35 kN de poids total autorisé en charge (PTAC)

PST : Partie Supérieure des Terrassements (voir PFi)

PTAC : Poids Total Autorisé en Charge

PTRA : Poids Total Roulant Autorisé

R : Risque

SATL : Station d'Analyse du Trafic Lourd

SICRE : Système d'Information sur la Connaissance du REseau routier national

TC : Trafic Cumulé

TPC : Terre-Plein Central

VL : Véhicule Léger

VRS : Voie du Réseau Structurant

Annexes

Annexe A - Matériaux

Les caractéristiques principales nécessaires pour le dimensionnement des structures de chaussées sont :

- le module de rigidité (E en MPa) ;
- le coefficient de Poisson (ν) ;
- la résistance en fatigue (ϵ_6 pour la déformation, en $\mu\text{déf}$; ou σ_6 pour la contrainte, en MPa).

Les autres caractéristiques sont prises conformes au guide de dimensionnement de 1994 [12].

Chaussées selon catalogue de 1977 actualisé en 1988

Abréviation	Nom complet	Paramètres pour le dimensionnement
BB	Béton Bitumineux	E = 5400 MPa $\nu = 0,25$
GNT	Grave non traitée	E = 400 MPa $\nu = 0,25$
GB	Grave bitume	E = 9300 MPa $\nu = 0,35$ $\epsilon_6 = 90 \mu\text{déf}$
GC	Grave ciment	E = 20000 MPa $\nu = 0,25$ $\sigma_6 = 0,70 \text{ MPa}$

Chaussées neuves

Abréviation	Nom complet	Référence normative	Paramètres pour le dimensionnement
BB	Béton Bitumineux	NF EN 13108-1	E = 5400 MPa $\nu = 0,35$
GNT2	Grave non traitée	NF EN 13285	E = 400 MPa $\nu = 0,35$
GB3	Grave bitume de classe 3	NF EN 13108-1	E = 9300 MPa $\nu = 0,35$ $\epsilon_6 = 90 \mu\text{déf}$
GC3	Grave ciment de classe 3	NF EN 14227-1	E = 23000 MPa $\nu = 0,25$ $\sigma_6 = 0,75 \text{ MPa}$

Annexe B - Utilisation d'Alizé

Présentation d'Alizé

Détermination des sollicitations mécaniques

Le moteur de calcul du logiciel Alizé permet la détermination des sollicitations créées par le trafic dans les différentes couches de matériaux constituant le corps de la chaussée. Il met en œuvre le modèle théorique de Burmister. Ce modèle s'appuie sur la modélisation mécanique de la structure par un massif semi-infini, constitué d'une superposition de couches de matériau d'épaisseur constante, à comportement élastique linéaire isotrope (figure 1).

Les paramètres descriptifs du comportement mécanique de chaque matériau sont donc au nombre de deux : le module de déformation E et coefficient de Poisson ν . Chaque interface entre couches adjacentes peut être prise collée, glissante ou semi-collée. Le chargement appliqué par les charges roulantes à la surface de la chaussée est représenté par un ensemble de disques circulaires, chargé chacun par une pression verticale, uniforme et statique. Toutes les combinaisons de charges élémentaires circulaires de ce type sont possibles. Ceci permet de reproduire les silhouettes d'essieu, de bogie, de véhicule ou d'ensemble de véhicules les plus diverses.

Dans les opérations de dimensionnement courant, un chargement unique, désigné chargement de référence, est en général appliqué à la surface du modèle. Ce chargement de référence est propre au cadre dans lequel la méthode de dimensionnement rationnel est appliquée. Par exemple, le jumelage de 65 kN (32,5 kN par roue, pression de contact 6,62 MPa) constitue, sauf cas particulier, la charge de référence pour le dimensionnement des structures de chaussée des réseaux routiers et autoroutiers français. Ce chargement est en fait représentatif des charges les plus lourdes appliquées par le trafic routier et autoroutier courant, aux structures de chaussée. Il correspond en effet à la charge maximale sur un essieu simple autorisée par le Code de la Route : 130 kN (13 tonnes environ). Cet essieu complet est ramené, dans le dimensionnement courant, à l'une de ces deux moitiés (jumelage de 65 kN soit environ 6,5 tonnes), en admettant l'hypothèse de non-interaction des deux jumelages sur les valeurs maximales des sollicitations induites dans la chaussée.

Le dimensionnement des chaussées selon la démarche rationnelle prend en considération le trafic poids lourds cumulé, N_{PL} , que supportera la chaussée pendant toute sa durée de service. Comme les calculs des sollicitations sont effectués pour le chargement de référence unique, il est nécessaire d'exprimer le trafic cumulé N_{PL} en nombre NE de charges de référence ayant le même effet, en terme d'endommagement, que le trafic réel poids lourd N_{PL} . Cette conversion fait intervenir le Coefficient d'Agressivité Moyen du trafic.

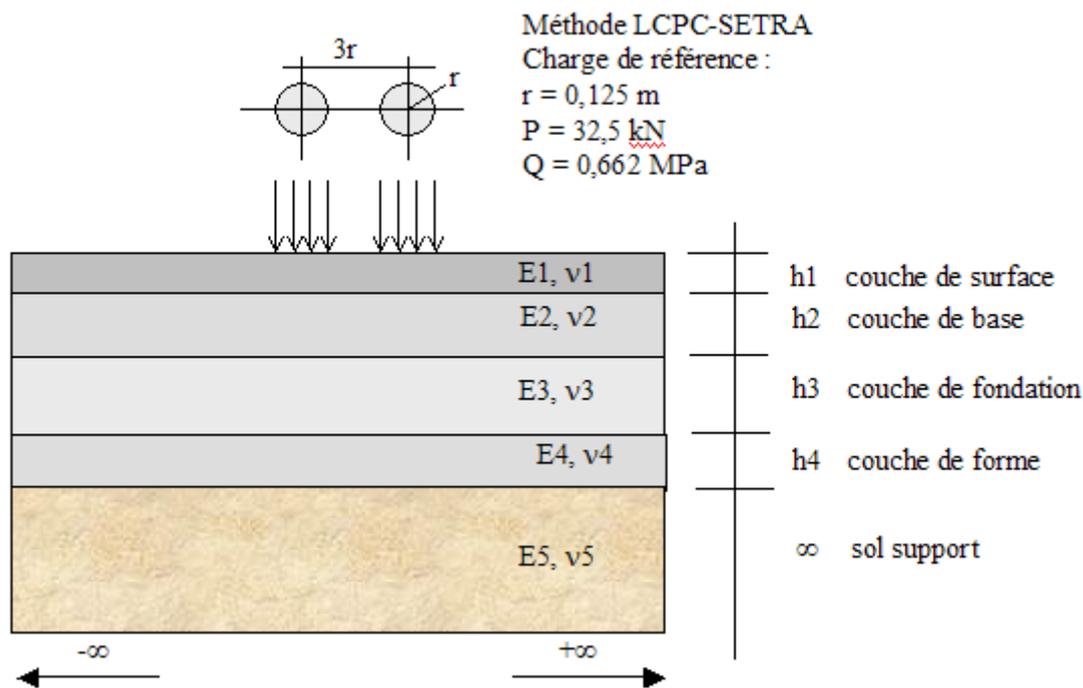


Figure 1 : logiciel Alizé – problème traité, exemple

Le modèle calcule les tenseurs complets de contraintes et de déformations, ainsi que les trois composantes de déplacement, en tout point de la structure. En utilisation courante, les résultats du modèle strictement nécessaires au dimensionnement se réduisent à la sollicitation maximale S_{maxj} supportée par chaque couche de matériau d'indice j ($j = 1$ pour la couche de surface à $j = nc$ pour le sol support). Suivant la nature du matériau concerné, S_{maxj} représente la grandeur définie par le tableau 1.

Nature de matériau n°j	Définition de S_{maxj}
Matériau hydrocarboné	Valeur de la déformation d'extension horizontale maximale ϵ_{tmaxj}
Matériau traité au liant hydraulique et béton	Valeur de la contrainte de traction horizontale maximale σ_{tmaxj}
Matériau non-traité et sol	Valeur de la déformation de compression verticale maximale ϵ_{tmaxj}

Tableau 1 : Type de sollicitation considérée par le dimensionnement rationnel, suivant la nature du matériau

Prise en compte de l'endommagement des matériaux

Connaissant la sollicitation maximale S_{maxj} induite par le trafic dans une couche de matériau donnée, l'estimation de la durée de vie de ce matériau, exprimée en nombre cumulé d'essieux de référence NE qu'il pourra supporter, repose essentiellement sur :

- les paramètres d'endommagement du matériau considéré. Ces paramètres de comportement résultent d'essais de fatigue réalisés en laboratoire. Des valeurs minimales sont fixées par les normes pour les matériaux standard qui s'y réfèrent.
- et sur la valeur du risque de rupture, ou risque de calcul R, admise pour la chaussée à l'issue de sa durée de service. En premier lieu, le paramètre R est une donnée d'ordre stratégique, reflétant le niveau de service que la Maîtrise d'Ouvrage cherche à garantir sur toute la durée de service de la chaussée.

Pour les matériaux traités (hydrocarbonés, traités aux liants hydrauliques et les bétons), le modèle d'endommagement adopté est le modèle d'endommagement par fatigue sous les sollicitations répétées de traction par flexion (modèle de Wöhler). Ce modèle relie la sollicitation S_{maxj} supportée par le matériau à la durée de vie S_{maxj} :

$$S \max_j = \varepsilon_6 \times Ka \times Kr \times \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b$$

ε_6 et b : paramètres d'endommagement descriptifs du comportement à la fatigue du matériau, résultant d'essais de fatigue sur éprouvettes en laboratoire ($b < 0$),

Ka : ensemble de coefficients additionnels pour la prise en compte de différents facteurs, non reproduits par les résultats bruts des essais de fatigue en laboratoire,

Kr : coefficient dépendant directement du risque de calcul R , et des dispersions présentées par le comportement à la fatigue du matériau et par son épaisseur de mise en œuvre sur chantier réel,

NE : trafic admissible par le matériau considéré, exprimé en nombre cumulé de passages de la charge de référence.

Hypothèse sur les interfaces

Trois hypothèses sur le fonctionnement des interfaces entre couches sont prévues par le modèle, à savoir :

- interfaces parfaitement adhérentes, se traduisant numériquement par la continuité des déplacements des deux matériaux en contact dans le plan horizontal de part et d'autre du plan d'interface ;
- interfaces totalement glissantes, se traduisant numériquement par l'annulation des contraintes de cisaillement horizontales dans les matériaux en contact de part et d'autre du plan d'interface ;
- interfaces semi-collées, correspondant à un comportement intermédiaire entre les deux situations précédentes. Pour cette hypothèse d'interface, les sollicitations dans les matériaux sont prises égales à la moyenne des sollicitations obtenues pour les 2 hypothèses de calcul précédentes.

Définition des charges

Les PL sont modélisés dans Alizé par la demi-empreinte de ceux-ci sur la chaussée. Les données à rentrer sont donc :

- l'abscisse et l'ordonnée de chaque charge (c'est-à-dire de chaque pneu) ;
- deux des trois données suivantes (la troisième est automatiquement déduite des deux autres) :
 - le rayon du disque faisant office d'empreinte ;
 - la pression du contact pneu-chaussée ;
 - le poids de la charge.

On a choisi dans cette étude de rentrer la pression de contact pneu-chaussée et le poids de la charge.

Concernant les pressions de contact, les hypothèses choisies ici sont les suivantes :

- on l'a considérée égale à 78% de la pression de gonflage des pneus ;
- celle-ci est de :
 - 0,85 MPa pour les pneus de 315 mm de large, simples jumelés,
 - 0,90 MPa pour les pneus simples de 385 mm de large montés en tridem.

Remarque : à poids par essieu constant.

Concernant les poids des charges, ils ont été choisis en tenant compte de la législation en vigueur en ce qui concerne les poids maximum autorisés par essieu et groupe d'essieux.

PL1 de 7,5 t :

½ Essieu / Pneu	Abscisse (m)	Ordonnée (m)	Pression de contact (MPa)	Poids (kN/10)
1 / 1	0	0	0,662	1,25
2 / 1	4.7	-0,1875	0,662	1,25
2 / 2	4.7	0,1875	0,662	1,25

PL1 de 12 t :

½ Essieu / Pneu	Abscisse (m)	Ordonnée (m)	Pression de contact (MPa)	Poids (kN/10)
1 / 1	0	0	0,662	2,00
2 / 1	6,5	-0,1875	0,662	2,00
2 / 2	6,5	0,1875	0,662	2,00

PL1 de 19 t :

½ Essieu / Pneu	Abscisse (m)	Ordonnée (m)	Pression de contact (MPa)	Poids (kN/10)
1 / 1	0	0	0,662	3,50
2 / 1	6,5	-0,1875	0,662	3,00
2 / 2	6,5	0,1875	0,662	3,00

PL2 :

½ Essieu / Pneu	Abscisse (m)	Ordonnée (m)	Pression de contact (MPa)	Poids (kN/10)
1 / 1	0	0	0,662	3,50
2 / 1	3,8	-0,1875	0,662	2,375
2 / 2	3,8	0,1875	0,662	2,375
3 / 1	5,15	-0,1875	0,662	2,375
3 / 2	5,15	0,1875	0,662	2,375

PL3 :

½ Essieu / Pneu	Abscisse (m)	Ordonnée (m)	Pression de contact (MPa)	Poids (kN/10)
1 / 1	0	0	0,662	3,50
2 / 1	3,7	-0,1875	0,662	2,5
2 / 2	3,7	0,1875	0,662	2,5
3 / 1	12,6	-0,1875	0,662	2,25
3 / 2	12,6	0,1875	0,662	2,25

PL4 :

½ Essieu / Pneu	Abscisse (m)	Ordonnée (m)	Pression de contact (MPa)	Poids (kN/10)
1 / 1	0	0	0,662	3,75
2 / 1	3,7	-0,1875	0,662	2,875
2 / 2	3,7	0,1875	0,662	2,875
3 / 1	11,25	-0,1875	0,662	2,375
3 / 2	11,25	0,1875	0,662	2,375
4 / 1	12,6	-0,1875	0,662	2,375
4 / 2	12,6	0,1875	0,662	2,375

PL5 :

½ Essieu / Pneu	Abscisse (m)	Ordonnée (m)	Pression de contact (MPa)	Poids (kN/10)
1 / 1	0	0	0,662	3,7
2 / 1	3,7	-0,1875	0,662	2,675
2 / 2	3,7	0,1875	0,662	2,675
3 / 1	9,9	0	0,700	3,65
4 / 1	11,25	0	0,700	3,65
5 / 1	12,6	0	0,700	3,65

PL6 :

½ Essieu / Pneu	Abscisse (m)	Ordonnée (m)	Pression de contact (MPa)	Poids (kN/10)
1 / 1	0	0	0,662	3,5
2 / 1	3,7	-0,1875	0,662	1,875
2 / 2	3,7	0,1875	0,662	1,875
3 / 1	5,05	-0,1875	0,662	1,875
3 / 2	5,05	0,1875	0,662	1,875
4 / 1	11,25	-0,1875	0,662	2,25
4 / 2	11,25	0,1875	0,662	2,25
5 / 1	12,6	-0,1875	0,662	2,25
5 / 2	12,6	0,1875	0,662	2,25

PL7 :

½ Essieu / Pneu	Abscisse (m)	Ordonnée (m)	Pression de contact (MPa)	Poids (kN/10)
1 / 1	0	0	0,662	3,75
2 / 1	5,5	-0,1875	0,662	2,875
2 / 2	5,5	0,1875	0,662	2,875
3 / 1	10,5	-0,1875	0,662	2,375
3 / 2	10,5	0,1875	0,662	2,375
4 / 1	16,1	-0,1875	0,662	2,375
4 / 2	16,1	0,1875	0,662	2,375

PL8 :

½ Essieu / Pneu	Abscisse (m)	Ordonnée (m)	Pression de contact (MPa)	Poids (kN/10)
1 / 1	0	0	0,662	3,5
2 / 1	5,5	-0,1875	0,662	2,75
2 / 2	5,5	0,1875	0,662	2,75
3 / 1	10,5	-0,1875	0,662	1,75
3 / 2	10,5	0,1875	0,662	1,75
4 / 1	16,1	-0,1875	0,662	1,875
4 / 2	16,1	0,1875	0,662	1,875
5 / 1	17,45	-0,1875	0,662	1,875
5 / 2	17,45	0,1875	0,662	1,875

PL9 :

½ Essieu / Pneu	Abscisse (m)	Ordonnée (m)	Pression de contact (MPa)	Poids (kN/10)
1 / 1	0	0	0,662	3,6
2 / 1	5	-0,1875	0,662	2,1
2 / 2	5	0,1875	0,662	2,1
3 / 1	6,35	-0,1875	0,662	2,1
3 / 2	6,35	0,1875	0,662	2,1
4 / 1	10,5	-0,1875	0,662	2,0
4 / 2	10,5	0,1875	0,662	2,0
5 / 1	16,1	-0,1875	0,662	2,0
5 / 2	16,1	0,1875	0,662	2,0

PL10 :

½ Essieu / Pneu	Abscisse (m)	Ordonnée (m)	Pression de contact (MPa)	Poids (kN/10)
1 / 1	0	0	0,662	3,0
2 / 1	5	-0,1875	0,662	1,75
2 / 2	5	0,1875	0,662	1,75
3 / 1	6,35	-0,1875	0,662	1,75
3 / 2	6,35	0,1875	0,662	1,75

4 / 1	10,5	-0,1875	0,662	1,5
4 / 2	10,5	0,1875	0,662	1,5
5 / 1	16,1	-0,1875	0,662	1,75
5 / 2	16,1	0,1875	0,662	1,75
6 / 1	17,45	-0,1875	0,662	1,75
6 / 2	17,45	0,1875	0,662	1,75

Dommmages, sollicitations et agressivités

Chaussée souple – Scénario sans PL

Les valeurs indiquées dans le tableau suivant représentent les dommages subis par le sol support lors du passage de 5×10^6 charges considérées.

Plate-forme	Dommmage		Agressivité
	Essieu de référence	PL1 de 12t	
PF1	967,93	132,66	0,14
PF2	599,26	94,94	0,16
PF3	63,38	10,79	0,17

Chaussées bitumineuses et semi-rigides

Dans le tableau suivant on retrouve les résultats obtenus par Alizé en terme de sollicitations ainsi que les agressivités calculées à partir de ces résultats.

Les calculs d'agressivité ont aussi été effectués à l'aide de la même méthode que pour les chaussées souples (c'est-à-dire calcul des dommages, à la base des couches liées dans ce cas), et les résultats obtenus sont – fort heureusement – identiques.

Essieu	Chaussées bitumineuses	Chaussées semi-rigides					
		Couche de base				Couche de fondation	
		ϵ_t ($\mu\text{déf}$)	Agressivité	σ_t (MPa)	Agressivité	σ_t (MPa)	Agressivité
PL	référence	49,2	1	0,41	1	0,47	1
PL1 < 7,5t	1	11,6	0,00	0,10	0,00	0,11	0,00
	2	19,1	0,01	0,16	0,00	0,18	0,00
			0,01		0,00		0,00
PL1 < 12t	1	17,9	0,01	0,15	0,00	0,17	0,00
	2	30,6	0,09	0,25	0,00	0,29	0,00
			0,10		0,00		0,00
PL1 < 19t	1	30,2	0,09	0,26	0,00	0,28	0,00
	2	45,2	0,66	0,38	0,35	0,42	0,33
			0,74		0,36		0,33
PL2	1	31,4	0,11	0,27	0,01	0,30	0,00
	2	36,6	0,23	0,32	0,04	0,40	0,18

	3	34,4	0,21	0,31	0,04	0,40	0,15
			0,55		0,09		0,34
PL3	1	31,2	0,10	0,27	0,01	0,29	0,00
	2	36,4	0,22	0,30	0,03	0,34	0,03
	3	34,4	0,17	0,29	0,01	0,32	0,01
			0,49		0,05		0,04
PL4	1	33,3	0,14	0,28	0,01	0,31	0,01
	2	41,6	0,43	0,35	0,14	0,39	0,11
	3	36,0	0,21	0,31	0,04	0,40	0,14
	4	35,9	0,21	0,31	0,03	0,40	0,14
			0,99		0,22		0,41
PL5	1	32,9	0,13	0,28	0,01	0,31	0,01
	2	38,3	0,29	0,32	0,05	0,36	0,04
	3	40,3	0,37	0,34	0,10	0,39	0,10
	4	45,1	0,65	0,38	0,35	0,43	0,41
	5	40,2	0,36	0,34	0,10	0,38	0,10
			1,80		0,60		0,66
PL6	1	31,2	0,10	0,27	0,01	0,29	0,00
	2	29,2	0,07	0,25	0,00	0,32	0,01
	3	28,8	0,07	0,25	0,00	0,32	0,01
	4	34,1	0,16	0,29	0,02	0,38	0,08
	5	34,0	0,16	0,29	0,02	0,37	0,07
			0,56		0,05		0,18
PL7	1	32,3	0,12	0,28	0,01	0,30	0,01
	2	41,9	0,45	0,35	0,14	0,39	0,11
	3	34,3	0,16	0,28	0,01	0,31	0,01
	4	35,6	0,20	0,29	0,02	0,33	0,02
			0,93		0,17		0,14
PL8	1	30,3	0,09	0,26	0,00	0,28	0,00
	2	40,4	0,37	0,34	0,09	0,37	0,07
	3	24,8	0,03	0,20	0,00	0,23	0,00
	4	28,5	0,06	0,25	0,00	0,31	0,01
	5	28,4	0,06	0,25	0,00	0,31	0,01
			0,62		0,10		0,09

PL9	1	31,3	0,10	0,27	0,01	0,29	0,00
	2	32,2	0,12	0,28	0,01	0,36	0,04
	3	32,4	0,12	0,28	0,01	0,36	0,04
	4	27,8	0,06	0,23	0,00	0,27	0,00
	5	30,0	0,08	0,25	0,00	0,28	0,00
				0,49		0,03	
PL10	1	26,4	0,04	0,23	0,00	0,25	0,00
	2	26,8	0,05	0,23	0,00	0,30	0,00
	3	26,9	0,05	0,23	0,00	0,30	0,00
	4	20,5	0,01	0,17	0,00	0,21	0,00
	5	26,5	0,05	0,23	0,00	0,29	0,00
	6	26,4	0,04	0,23	0,00	0,29	0,00
				0,20		0,00	

Annexe C - Détail des coûts

Présentation de l'action "suivi du coût des techniques"

L'action

Le suivi du coût des techniques est une enquête réalisée chaque année auprès des services gestionnaires du réseau routier national non concédé.

Elle produit une photographie annuelle des offres de prix des techniques courantes d'enrobés dans le cadre particulier des marchés de chaussées du réseau routier national non concédé. Cette photographie est distribuée aux services à titre informatif pour qu'ils disposent de repères économiques dans leur action.

Son origine

Cette action a été lancée en 1992 à la demande des Centres d'études techniques de l'équipement (Cete) sous l'initiative du Sétra. Cette action était destinée à perpétuer et conserver un savoir-faire existant dans le domaine des études technico-économiques en matière de chaussées.

Il s'agissait de donner une photographie en temps réel d'un niveau moyen de prix et de suivre son évolution dans le temps, uniquement à titre de repère.

Bien que fournissant une photographie uniquement informative, cette action a été maintenue jusqu'à présent. Elle a d'une part contribué à conserver une vision économique au sein du Réseau Scientifique et Technique et au sein des services et d'autre part permis au Sétra d'avoir une vision claire sur les évolutions de prix qui sont parfois spécifiques au marché du réseau routier national non concédé.

Les modalités de l'enquête

Le Sétra, par l'intermédiaire des Cete, demande aux services gestionnaires du réseau routier de transmettre au correspondant prix du Cete de leur zone d'action leur(s) marché(s) de l'année N en temps réel (c'est-à-dire l'année N).

Chaque correspondant prix de Cete extrait du bordereau des prix et du détail estimatif de chaque marché les prix unitaires correspondants aux techniques suivies et les quantités mises en œuvre. Avec l'ensemble de ces données, il produit une moyenne pondérée des prix par technique sur sa zone d'action. Ces moyennes sont transmises au correspondant du Cete coordonnateur qui est le Cete d'Aix-en-Provence. Ce dernier produit pour le Sétra une moyenne arithmétique par technique et indique les moyennes inter-régionales minimales et maximales obtenues.

Au printemps de l'année N+1 (vers le 15 mars), le Sétra transmet aux services (gestionnaires et RST) un tableau présentant les prix moyens nationaux de l'année N, par technique et ce depuis 1992 (pour les derniers envois sur les dix dernières années), plus une estimation informative du prix de quatre types classiques de chaussées neuves.

Dans le premier semestre de l'année N+1, chaque Cete participant distribue au niveau local un document inter-régional précisant de manière plus détaillée les résultats obtenus sur l'inter-région l'année N.

Limites de l'enquête

La transmission des marchés par les services gestionnaires n'est pas une obligation. Cette action ne couvre donc pas l'ensemble des marchés passés.

Pendant quelques années, le Sétra n'a pas eu de correspondant au Cete de Lyon. Cette inter-région n'a donc pas été couverte pendant ce temps. L'enquête n'a jamais intégré la région parisienne, qui est très spécifique.

Le Sétra n'a jamais recherché l'exhaustivité, mais simplement une population représentative permettant de fournir des éléments de repère voire de dégager des tendances. L'objectif majeur a toujours été la rapidité de diffusion des données (mars de N+1 pour des prix N).

Les prix unitaires saisis sont les prix remis lors de l'offre. Cette action ne tient donc pas compte des révisions de prix. Jusqu'à présent, cela n'avait que peu d'influence sur la vision du Sétra.

La restructuration complète du réseau routier national non concédé va probablement rendre inopérant le suivi inter-régional de l'évolution des prix.

Chaussée souple – Scénario 0 (sans PL)

Données constructives

Les données constructives pour la chaussée souple qui serait construite dans le scénario 0 où l'on considère que très peu de PL emprunteront l'infrastructure sont issues de réflexions sur la réduction du profil en travers envisageable dans le cas d'une route à 2*2 voies sans PL. Elles sont les suivantes :

- largeur de chaussée : 6 m dans chaque sens de circulation,
- largeur du TPC (BDG et bande médiane) : 1,5 m,
- BAU : 2 m de chaque côté (revêtue sur 1 m),
- Berme : 1 m de chaque côté,
- trafic PL attendu : peu de PL (cf. hypothèses dans le rapport).

Le schéma suivant, issu de l'Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Autoroutes de Liaison (ICTAAL, [10]), rappelle pour mémoire les éléments constitutifs du profil en travers de la section courante d'une route.

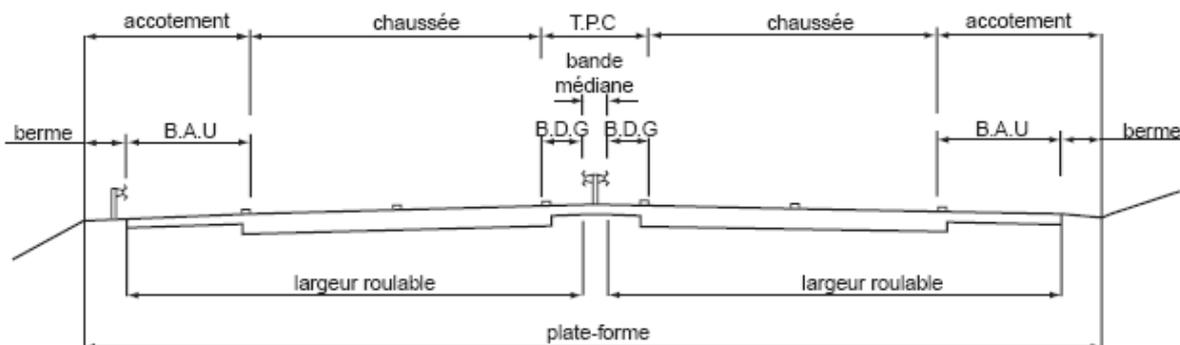


Figure 2 : Eléments constitutifs du profil en travers en section courante

Cubatures

Minimum technologique pour PF1

Matériau	Quantité
BB	1,49 t
GNT (base)	2,65 m ³
GNT (fondation)	2,69 m ³

Résultat du calcul, PF1

Matériau	Quantité
----------	----------

BB	1,49 t
GNT (base)	2,65 m3
GNT (fondation)	1,79 m3

Minimum technologique pour PF2 et PF3

Matériau	Quantité
BB	1,49 t
GNT (base)	2,65 m3

Résultat du calcul, PF2

Matériau	Quantité
BB	1,49 t
GNT (base)	2,11 m3

Résultat du calcul, PF3

Matériau	Quantité
BB	1,49 t
GNT (base)	0,70 m3

Chaussées bitumineuses et semi-rigides

Données constructives

Les données constructives utilisées pour évaluer le coût des chaussées bitumineuses et semi-rigides en fonction du scénario de trafic considérées sont identiques : il s'agit des données standard, préconisées dans l'instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison (ICTAAL) pour la construction de routes à 2x2 voies :

- largeur de chaussée : 7 m dans chaque sens de circulation,
- largeur du TPC : 3 m,
- BAU : 3 m de chaque côté,
- Berme : 1 m de chaque côté,
- trafic PL attendu : trafic décrit dans chacun des scénarios étudiés,
- plate-forme : deux types de plates-formes (PF2 et PF3) sont étudiés.

Cubatures – Chaussées bitumineuses

Scénario 1, PF2

Matériau	Quantité
BB	3,32 t
GB3	7,61 t
GNT	1,43 m3

Scénario 1, PF3

Matériau	Quantité
BB	3,32 t
GB3	5,92 t
GNT	1,09 m3

Scénario 2, PF2

Matériau	Quantité
BB	4,04 t
GB3	10,65 t
GNT	2,17 m3

Scénario 2bis, PF2

Matériau	Quantité
BB	4,04 t
GB3	10,25 t
GNT	2,10 m3

Scénario 2 et 2bis, PF3

Matériau	Quantité
BB	4,04 t
GB3	9,01 t
GNT	1,89 m3

Scénario 3, PF2

Matériau	Quantité
BB	4,04 t
GB3	14,42 t
GNT	2,78 m3

Scénario 3, PF3

Matériau	Quantité
BB	4,04 t
GB3	11,94 t
GNT	2,36 m3

Cubatures – Chaussées semi-rigides

Scénario 1, PF2

Matériau	Quantité
BB	3,32 t
GC3	11,26 t
GNT	2,03 m3

Scénario 1, PF3

Matériau	Quantité
BB	3,32 t
GC3	9,26 t
GNT	1,70 m3

Scénario 2 et 2bis, PF2

Matériau	Quantité
BB	4,04 t
GC3	16,74 t
GNT	3,00 m3

Scénario 2 et 2bis, PF3

Matériau	Quantité
BB	4,04 t
GC3	12,47 t
GNT	2,42 m3

Scénario 3, PF2

Matériau	Quantité
BB	6,20 t
GC3	17,99 t
GNT	3,74 m3

Scénario 3, PF3

Matériau	Quantité
BB	6,20 t
GC3	15,08 t
GNT	3,28 m3

Dans un contexte de transposition de la directive Eurovignette 2006/38/CE, la Direction Générale des Routes a demandé au Sétra d'étudier l'incidence du trafic des Poids Lourds sur les coûts de construction et d'entretien des routes afin de calculer des coefficients d'imputation des charges d'infrastructures routières entre différents usagers de la route, à savoir dans le cas présent les Véhicules Légers et les différents types de PL.

Ce rapport d'étude présente les résultats obtenus pour l'analyse de l'impact de la prise en compte du trafic PL sur les coûts de construction des chaussées. Il vient alimenter l'étude globale sur l'incidence du trafic PL sur les coûts des routes.

Rédacteurs

Grégoire Durand – Sétra
téléphone : 33 (0)1 46 11 36 48
mél : gregoire.durand@developpement-durable.gouv.fr

Pascaline Cousin – Sétra
téléphone : 33 (0)1 46 11 30 45
mél : pascaline.cousin@developpement-durable.gouv.fr

