

François BRILLET
Laboratoire central
des ponts et chaussées
francois.brillet@lcpc.fr

Projet européen FORMAT : quantification de la gêne causée par les chantiers d'entretien

■ RÉSUMÉ

Le travail réalisé au Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) dans le cadre du projet FORMAT (Fully Optimised Road MAInTenance : entretien routier complètement optimisé) de l'Union européenne, et plus spécialement dans le programme de travail 4 (WP4) consacré à l'analyse coût-avantage de l'entretien routier, est décrit. Dans ce contexte, les pertes de temps subies par les usagers lors d'un chantier sont prises en compte. À cette fin, un programme de calcul probabiliste des temps d'attente, qui utilise comme données d'entrée la description du chantier ainsi qu'un ensemble de coefficients caractérisant les variations du trafic, a été mis au point, sous la forme d'une feuille de calcul. Le modèle, tel qu'il peut être appliqué à un chantier donné, donc au niveau « projet », puis quelques aspects du programme expérimental ayant servi à le valider, sont décrits. Une extension au « niveau réseau », fondée sur une typologie des routes nationales françaises, est ensuite proposée.

The “FORMAT” European project: Quantification of the congestion caused by road maintenance works

■ ABSTRACT

The work conducted at LCPC within the framework of the European Union's “FORMAT” (Fully-Optimized Road MAInTenance) project, and more precisely as part of Workpackage 4 (WP4) devoted to the cost-benefit analysis of road maintenance, will be described herein. With this backdrop, the time losses experienced by road users during maintenance works will be accounted for. For purposes of this study, a probabilistic waiting time calculation program, whose input data includes a worksite description and a set of coefficients characterizing road traffic variations, has been developed in spreadsheet format. The model, in its form for site application (i.e. at the “project” level), along with a few aspects of the experimental program used for validation tasks will be detailed. An extension to the “network level”, based on a typology of France's national highways, will also be offered.

PRÉSENTATION

■ Le projet FORMAT

Une gestion optimisée de l'entretien des routes nécessite de prendre en compte de nombreux paramètres. Il ne suffit pas en effet de chercher à atteindre un niveau de service suffisant au moindre coût, mais aussi de prendre en compte :

- les conséquences pour l'utilisateur, notamment en matière de sécurité, de confort et de gêne lors des chantiers ;

- diverses considérations liées à l'environnement (bruit, pollution atmosphérique, contribution à l'effet de serre, épuisement des ressources, production de déchets) ;
- la sécurité des personnes intervenant sur le chantier.

C'est pour mettre en commun les acquis et les recherches de différents pays européens qu'a été monté le projet FORMAT [1], dans le cadre de l'Union européenne. Les travaux du groupe constitué dans ce but se sont déroulés sur trois ans, de février 2002 à janvier 2005, et ont associé douze organismes dans onze pays européens, ainsi que le FHWA (Federal Highway Administration) américain.

Les actions prévues ont été distribuées en sept programmes de travail (WP = Work Package), dont quatre couvrent les questions techniques :

- WP3 « Technologie »,
- WP4 « Analyse coût-avantage »,
- WP5 « Sécurité »,
- WP6 « Auscultation ».

Des chercheurs du LCPC ont été associés à trois de ces groupes : le WP3 pour les expériences réalisées sur le manège de fatigue du LCPC [2], le WP6 pour des comparaisons entre appareils de mesure de la déflexion [3, 4] et le WP4 pour le travail décrit ici.

■ Le « work package » 4 - analyse coût-avantage

Outre le LCPC, qui en assurait la présidence, le programme traitant de l'analyse coût-avantage (WP4) a associé les organismes suivants :

- le Centre finlandais de recherches techniques (VTT) ;
- l'Institut national de génie civil (ZAG) de Slovénie ;
- le Transport Research Laboratory (TRL) britannique ;
- le Laboratoire des voies de communication (LAVOC) de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), en Suisse ;
- l'université technique de Karlsruhe, en Allemagne.

Les sociétés AUMAR (concessionnaire espagnol d'autoroutes) et COLAS, ainsi que le centre de recherches routières (CRR) belge, sont également intervenus dans les expériences de validation sur chantier réel.

L'analyse « coût-avantage », objet du WP4, est une technique classique de calcul économique, visant à une utilisation optimale des ressources disponibles dans le cadre d'une collectivité humaine. On l'appelle également « analyse coût-bénéfice » (traduction littérale de l'anglais « cost benefit analysis ») mais, dans le contexte présent, où certains coûts n'ont aucune existence financière, le terme « avantage » est préférable. Dans le domaine routier, elle est depuis longtemps appliquée à la justification de projets de routes neuves ou à la comparaison de variantes de tracé. En ce qui concerne l'entretien des chaussées, elle a été utilisée dans les pays en développement pour justifier les travaux d'entretien par les économies réalisées sur les coûts des transports, notamment depuis les années 1980 avec l'application du modèle HDM (Highway Development and Management) [5]. Plus récemment, le projet PAV-ECO [6] a traité de ce sujet (de 1996 à 1997) et de son application au contexte européen.

Comme le montre le **tableau 1**, on peut inclure dans une analyse coût-avantage de nombreux éléments, dont l'appréciation peut nécessiter des développements très complexes, et sur lesquels un consensus n'est pas toujours facile à atteindre, notamment pour les « externalités » (coûts subis par des agents économiques qui ne sont ni gestionnaire ni usagers).

Pour traiter ces différents impacts de l'entretien, il faut d'abord comprendre les phénomènes mis en jeu, puis les modéliser et chiffrer (« monétariser ») les coûts sur la base de coûts unitaires adéquats ; en France, des coûts unitaires sont proposés pour les externalités (rareté du pétrole, valeur de la vie

tableau 1
Principaux éléments
pouvant entrer dans une
analyse coût-avantage de
l'entretien des chaussées.

	Maître d'ouvrage	Usager	Externalités
Avantages liés à l'usage de la route	Péages, taxes et redevances	Mobilité des personnes Transports de marchandises Agrément (tourisme) Usages potentiels (secours, déviations)	Emploi Bénéfices des entreprises Valeur du patrimoine immobilier
Coûts liés à l'usage de la route	Exploitation Surveillance Dégâts dus aux accidents Diminution de la valeur patrimoniale des chaussées	Carburant et autres consommations des véhicules Amortissement et entretien des véhicules Temps de parcours Accidents Inconfort	Pollutions (air, eau, sols) Bruit émis Insécurité des riverains Gaz à effet de serre Raréfaction des ressources Production de déchets
Coûts liés aux chantiers	Coût des travaux Exploitation sous chantier Accidents de chantier	Augmentation des consommations et des temps de parcours, accidents et inconfort	Augmentation des pollutions, bruit, etc. liés à l'usage de la route Pollutions, bruit, etc. liés aux travaux (matières premières, fabrication, transport et mise en œuvre des matériaux)
Avantages liés aux chantiers	Augmentation de la valeur patrimoniale des chaussées	Aucun	Emploi Bénéfices des entreprises Incorporation de sous-produits

humaine, du temps, des nuisances, etc.) dans le rapport Boiteux [7], qui vise à optimiser les choix d'investissement dans les transports.

Évidemment, ces étapes n'étaient pas toutes réalisables ni prioritaires, compte tenu de l'état des connaissances et du débat politique. Des choix ont dû être faits lors de l'élaboration du projet FORMAT, en considérant l'importance des enjeux, l'existence de « leviers » au niveau des politiques d'entretien, et le caractère réalisable des modèles. La première tâche du WP4, au cours de l'année 2002, a consisté à définir le contenu des différents modèles, au vu de ce qui existait déjà [8].

■ Éléments pris en compte

➤ Préservation du patrimoine

L'analyse patrimoniale [9] est un moyen de faire entrer l'évolution de l'état des chaussées dans une analyse coût-avantage ; elle consiste à attribuer à la chaussée neuve une valeur égale à son coût de construction, et à faire évoluer au cours du temps cette valeur en fonction de variables d'état et des opérations d'entretien : la valeur de la chaussée à un moment donné est égale à la valeur à neuf diminuée du coût des travaux nécessaires pour la remettre dans un état équivalent ; à l'extrême, si son état exige une reconstruction totale, sa valeur est réduite à zéro.

Le VTT (Finlande) a été chargé de cette partie du travail, qui a abouti à un modèle d'évolution paramétrable, dans lequel l'utilisateur définit les indicateurs d'état, les seuils d'intervention et les techniques applicables, avec leurs lois d'évolution. Le but du travail n'était pas bien sûr de proposer des modèles élaborés d'évolution des chaussées, ceux-ci ayant été développés dans d'autres contextes (projet PARIS [10, 11], coopération franco-québécoise [12]) : pour illustrer la démarche, des relations linéaires, fondées sur des coefficients définis *a priori*, ont été proposées.

➤ Pertes de temps sur chantier

Dans le cadre d'une analyse coût-avantage, le coût des travaux ne concerne pas seulement les dépenses résultant des chantiers, mais également tous les inconvénients subis par l'usager, les riverains, l'environnement, etc. Les temps perdus par les usagers du fait des restrictions de vitesse ou de capacité (attentes, limitations de vitesse, déviations), ainsi que les surconsommations de carburant

qui en découlent, relèvent de cette catégorie de coûts. Le travail confié au LCPC était de mettre au point et d'appliquer un modèle permettant de les quantifier.

La phase de validation a consisté à étudier huit cas de chantiers réels, où les données nécessaires ont été collectées (comptages détaillés de trafic, mesure des vitesses pratiquées, observation de la présence de bouchons, etc.). Quatre de ces expériences ont eu lieu en France, sous l'égide du LCPC (et de la société COLAS pour l'expérience de Toulouse [13]). Une autre située en Espagne a été réalisée par la société concessionnaire AUMAR. Les trois autres expériences ont été organisées en Slovénie (par le ZAG), en Suisse (par le LAVOC) et en Belgique (par le CRR).

› Sécurité

La présence d'un chantier d'entretien augmente le risque d'accident pour l'utilisateur et les autres intervenants ; le travail du WP5, consacré à ce problème [14], a fourni des éléments qui ont été intégrés à l'analyse coût-avantage par l'université technique de Karlsruhe (Allemagne).

› Environnement

Le travail, réalisé par le TRL (Grande Bretagne), a porté sur la modélisation de trois éléments de l'analyse coût-avantage :

- avantages liés à l'utilisation de matériaux recyclés dans les travaux d'entretien, notamment sur les émissions de dioxyde de carbone dues au transport des matériaux ;
- émission supplémentaire de dioxyde de carbone par les véhicules sur les routes en chantier ;
- bruit émis en fonction du type et de l'âge de la surface de chaussée.

Notons que, dans ce domaine, aucune expérimentation n'a été conduite dans le cadre de FORMAT ; les trois points ci-dessus ont utilisé respectivement :

- les données d'une enquête menée à la demande du gouvernement britannique sur soixante chantiers ayant mis en jeu un recyclage de matériaux [15] ;
- des relations consommation-vitesse [16, 17] définies *a priori* (aucune mesure de consommation n'était prévue dans les expérimentations décrites plus loin) ;
- des résultats obtenus au TRL pour l'évolution des caractéristiques sonores de trois types de couches de surface [18, 19].

Il s'agissait donc d'éléments représentatifs des dernières recherches menées en Grande Bretagne, mais qui ne prétendaient nullement apporter de réponse définitive aux questions posées, ni dans ce pays ni ailleurs en Europe.

› Intégration

Elle a consisté à créer un modèle « intégré » prenant en compte tous les éléments proposés, et permettant la simulation sur une longue durée (trente ans) pour une section de route donnée. Ce travail a été confié au LAVOC (Suisse).

Le produit « final » consiste en un fichier Microsoft Excel contenant les différentes feuilles de calcul et « macros » qui permettent à un utilisateur de faire fonctionner les différents modèles. Il ne s'agit pas pour autant d'un produit « fini » comme le serait un logiciel commercial car, s'il a été utilisé dans divers contextes lors des expériences de validation, il n'a pas été soumis à un programme systématique de tests visant à détecter d'éventuelles erreurs ou dysfonctionnements dans les calculs ou l'ergonomie.

Pour ce qui est de son contenu, le « modèle intégré » n'est pas non plus à considérer comme un outil complet et homogène : certains éléments, comme l'évolution des chaussées, ont été simplifiés à l'extrême, et d'autres, comme le bruit de roulement, les consommations et émissions des véhicules, ou encore l'effet des chantiers sur la sécurité, font appel à des données expérimentales encore limitées et provisoires.

Enfin, dans le cadre de la validation, une analyse de sensibilité a été réalisée par le VTT (Finlande) afin de détecter l'importance relative des différentes variables dans les résultats de l'analyse.

PRINCIPES DU MODÈLE

■ Prévision des variations de trafic

› Généralités

Notre expérience quotidienne nous prouve que la prévision du trafic est loin d'être une science exacte ; il n'empêche qu'elle peut être modélisée, en acceptant une certaine marge d'imprécision, d'où l'idée de quantifier la demande de trafic de manière probabiliste, afin d'en déduire l'incidence des retards provoqués par les chantiers d'entretien routier. Cela consiste à déterminer, à tout instant d'une journée, la probabilité pour le flot de trafic d'atteindre un niveau donné correspondant à la capacité résiduelle de la route en chantier. En effet, dès que cette capacité résiduelle est dépassée par le flot de trafic entrant, les véhicules en excès doivent attendre (s'il ne s'offre à eux aucune autre option) et il se forme un bouchon, dont la longueur peut être calculée.

La mise au point du modèle de trafic est décrite en détail dans [20]. Les calculs statistiques ont fait appel au logiciel StatGraphics Plus [21], version 4.1 pour MS-Windows.

› Données disponibles

Les stations SIREDO (Système Informatisé de Recueil des Données) [22], réparties sur le réseau des routes nationales françaises, assurent en continu les comptages de circulation ; on dispose ainsi de l'ensemble historique des comptages par tranches d'une heure. Certaines stations effectuent en outre un comptage séparé des poids lourds et fournissent d'autres indications concernant les poids par essieux et les vitesses. Sur demande spéciale, des exploitations telles que le comptage par période de six minutes peuvent être obtenues, mais aucune demande rétroactive n'est bien sûr possible, les relevés unitaires n'étant pas archivés.

Des fichiers de comptages ont été fournis par le CETE (centre d'études techniques de l'Équipement) de l'Ouest. Quatre stations correspondant à des niveaux et types de trafic différents ont été choisies : route nationale (RN) 171 à Blain, RN 165 au Temple-de-Bretagne, RN 157 à Brécé et RN 844 (périphérique de Nantes).

› Modèle déterministe

Une première tentative de modélisation a consisté à prédire le volume de trafic des vingt-quatre tranches horaires journalières à partir d'un nombre limité de comptages : il est ainsi apparu que le comptage sur quatre tranches horaires suffisait à reconstituer avec une bonne précision l'ensemble des vingt-quatre tranches. Cette façon de procéder présentait toutefois deux inconvénients : les tranches ayant le meilleur pouvoir prédictif n'étaient pas les mêmes suivant le jour et la localisation, et les variations à l'intérieur des tranches horaires étaient ignorées.

Il valait donc mieux chercher une fonction continue calculable à partir d'un nombre limité de paramètres, et c'est l'examen visuel des courbes qui a donné le chemin à suivre : comme il existe à peu près toujours deux ou trois pointes de trafic, l'évolution peut être modélisée à partir de la somme de courbes « en cloche », dont les coefficients sont calculables à partir de données réelles par une régression non linéaire.

› Modèle probabiliste

Après calcul des coefficients, il reste une part de variance non expliquée, addition de trois phénomènes : l'imperfection du modèle, les différences entre jours successifs et les variations aléatoires. L'ajout d'un terme probabiliste a consisté à modéliser les résidus (différences entre valeur observée et valeur prédite) avec les hypothèses suivantes :

- les résidus suivent une loi normale, sauf si cela conduit à une valeur négative, auquel cas la prédiction est fixée à zéro ;
- l'écart type de la loi est constant au cours de la journée.

L'analyse statistique des résidus a montré que la première hypothèse est assez bien vérifiée, mais que la seconde l'est moins (l'incertitude croît avec la valeur prédite).

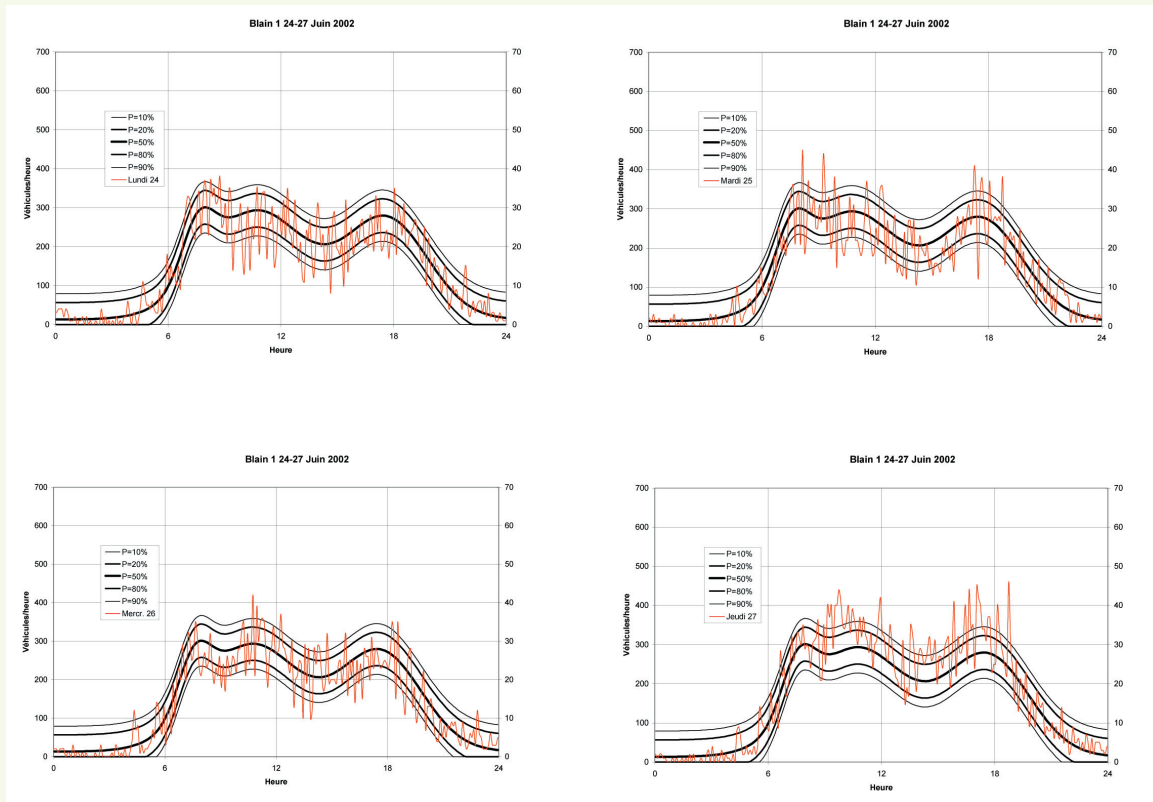


figure 1

Données réelles (lundi 24 au jeudi 27 juin 2002) et prédictions pour le poste de Blain 1.

La **figure 1** illustre l'application de ces principes, à partir de comptages par six minutes sur un poste durant quatre jours :

- calcul du trafic aux probabilités de 10, 20, 50, 80 et 90 % selon le modèle, calé sur l'ensemble des quatre jours (courbes noires) ;
- données réelles pour chacun des quatre jours (en couleur).

■ Calcul des longueurs de bouchons

La présence de bouchons est due à un excès du débit de trafic Q , modélisé au paragraphe précédent, par rapport à la capacité C de la route. La relation entre la géométrie de la route et sa capacité peut faire l'objet de modèles plus ou moins complexes, probabilistes ou non ; il en est de même des relations entre la vitesse et le rapport débit-capacité. Ici, cependant, le modèle retenu est simple, ne considérant que deux situations : écoulement libre ou bouchon. Connaissant Q à l'instant t pour une probabilité p , il calcule le nombre de véhicules présents dans la queue qui se forme lorsque Q dépasse C , supposée constante au cours du chantier.

Les grandeurs Q et C s'expriment normalement en UVP (unité véhicule particulier), en considérant que, selon leur type, les véhicules occupent plus ou moins de place ; le nombre d'UVS est calculé en attribuant aux véhicules légers (VL) un coefficient 1 et aux poids lourds (PL) un coefficient supérieur à 1 (1,6 dans les cas réels décrits dans cet article). Les variations du pourcentage de PL n'étant pas toujours connues, Q et C peuvent également être exprimés en véhicules par heure (v/h), tous types confondus.

Pour calculer le nombre de véhicules immobilisés, les principes développés dans le cadre de PAV-ECO [6] et ayant servi à réaliser le logiciel ECCU [23] ont été repris :

- si, à l'instant t , il n'existe aucune queue et si la capacité n'est pas dépassée, alors la longueur de queue reste nulle ;
- dans les autres cas, la différence entre Q et C s'ajoute algébriquement au nombre de véhicules présents dans la queue, et si le résultat est négatif la queue disparaît.

Ce calcul suppose bien sûr qu’aucune déviation n’est possible et que l’existence de la queue n’a aucune influence sur le nombre de véhicules entrant, ce qui est tout à fait théorique : dans la réalité, on assiste souvent, surtout si le chantier dure longtemps, à une limitation spontanée de la demande.

La **figure 2** donne un exemple de simulation, pour les données de trafic du poste de Blain dans le sens 1 (Laval vers Saint-Nazaire), d’un chantier hypothétique au cours duquel la capacité serait réduite à 250 v/h. Les caractéristiques calculées des bouchons sont indiquées dans le **tableau 2**. La probabilité à p % signifie ici que le volume de trafic a une probabilité de p % de se situer au-dessous de la valeur indiquée.

Dans cet exemple, les trois premiers jours ont des caractéristiques proches de la probabilité à 50 %, bien que légèrement au-dessous ; le quatrième en revanche se rapproche de la probabilité à 80 %.

figure 2
Exemple d’estimation de la longueur de queue (Blain sens 1, C = 250 v/h) (traits pleins : calcul d’après le trafic prédit par le modèle, selon plusieurs valeurs de p ; pointillés : calcul d’après le trafic réel observé au cours des quatre jours).

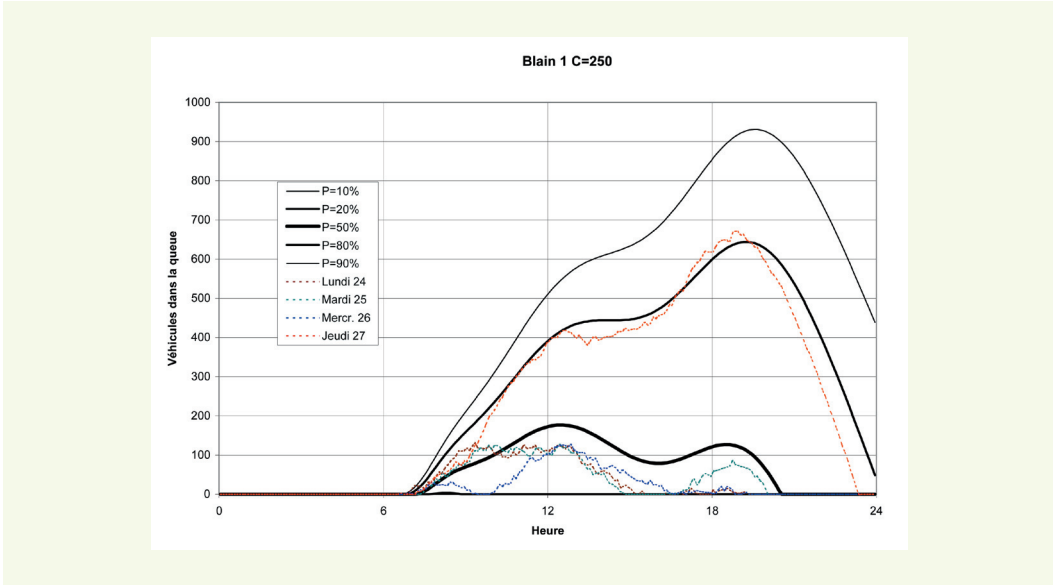


tableau 2
Caractéristiques calculées des bouchons pour différentes capacités résiduelles (hypothétiques) C.

Données	Trafic total journalier	C = 250 v/h			C = 300 v/h		
		Durée de bouchon	N maxi véhicules	Heures perdues	Durée de bouchon	N maxi véhicules	Heures perdues
Lundi 24	3 735	11 h	130	693	3 h 30	31	34
Mardi 25	3 683	11 h	127	762	3 h 50	18	28
Mercredi 26	3 701	11 h 45	127	488	3 h 20	28	27
Jeudi 27	4 416	16 h 55	671	5 923	12 h 05	159	847
Prob. 10 %	3 549	0 h	0	0	0 h	0	0
Prob. 20 %	3 663	1 h 25	4	3	0 h	0	0
Prob. 50 %	3 881	13 h 20	177	1 389	0 h	0	0
Prob. 80 %	4 099	17 h 15	644	6 557	12 h 30	141	820
Prob. 90 %	4 213	> 17 h 30	931	> 9 935	14 h	311	2 988

■ **Classification des jours**

➤ **Objectif**

Les premières analyses de comptages d’une année complète ont mis en évidence des variations, tant hebdomadaires que saisonnières, plus ou moins marquées. Le travail qui a suivi a consisté à explorer systématiquement les relations qui peuvent exister entre un classement *a priori* (au vu

d'un calendrier) et un autre fondé sur les comptages réels [24]. Les données utilisées concernent les quatre postes de comptage, dans chaque sens (ce qui fait huit séries), pour l'ensemble de l'année 2001.

Le classement hebdomadaire *a priori* a été fondé sur cinq classes :

1. les lundis,
2. les mardis, mercredis et jeudis,
3. les vendredis,
4. les samedis,
5. les dimanches.

L'existence de jours fériés et des « longs week-ends » qui en résultent (cette appellation s'applique aux séries de trois ou quatre jours comprenant un week-end et un jour férié, plus un éventuel « pont ») a conduit à ajouter les règles suivantes :

- les jours suivant un long week-end sont classés en 1,
- les jours précédant un long week-end sont classés en 3,
- les « ponts » sont classés en 4,
- les jours fériés sont classés en 5.

Notons que l'année considérée (2001) ne comporte pas de « long week-end » de plus de quatre jours, ce qui d'ailleurs ne se produit en France que très rarement.

L'idée de base du classement saisonnier a été de distinguer deux périodes, mais aucun critère n'est apparu comme évident pour en fixer les limites ; c'est pourquoi plusieurs hypothèses (par mois entiers) ont été testées, après avoir éliminé le classement « tropique » (l'été allant du solstice à l'équinoxe) et le classement « scolaire » (trop fragile et dépendant des régions, etc.).

Une autre classification a été réalisée sur la base des seuls comptages, sans intervention extérieure, afin de classer « objectivement » les jours en un nombre prédéfini de « groupes » : successivement deux, trois, quatre et cinq. Pour cela, la méthode classique d'analyse de données multifactorielle a été appliquée, en deux étapes :

- réduction des vingt-quatre variables (les comptages par tranche d'une heure) à quatre « axes factoriels » représentatifs, grâce à une analyse en composantes principales (ACP) ;
- regroupement automatique des 365 « individus » (les jours) en « groupes », par classification ascendante hiérarchique (CAH), selon leurs coordonnées sur les quatre axes.

Les deux classifications ont été ensuite « croisées » afin de déterminer quelle classification *a priori* (c'est-à-dire fondée sur le calendrier) était la plus pertinente.

➤ Comparaison des classements hebdomadaire et automatique

L'objectif était de déterminer si la classification hebdomadaire décrite précédemment recoupait les « groupes » réalisés automatiquement à partir des comptages horaires. Sur la **figure 3**, on compare successivement la classification en cinq cas définis précédemment (en abscisse), à la partition en deux, trois, quatre puis cinq groupes (représentés par des couleurs différentes) ; l'exemple présenté concerne la station Blain (RN 171) sens 1.

On y voit clairement que, plus le nombre de groupes est élevé, moins l'adéquation est bonne : si avec deux groupes la distinction entre jours ouvrés et week-ends est presque parfaite, avec cinq groupes la classe 1 (lundis) ne se distingue pas de la classe 2 (mardis, mercredis et jeudis), et ne peut être assimilée à aucun groupe.

Il a donc été jugé préférable de distinguer quatre classes, même si l'adéquation n'est pas parfaite : le groupe 2 (en rouge) contient pratiquement tous les samedis, mais inclut aussi un nombre non négligeable de dimanches et fêtes, plus quelques jours de semaine.

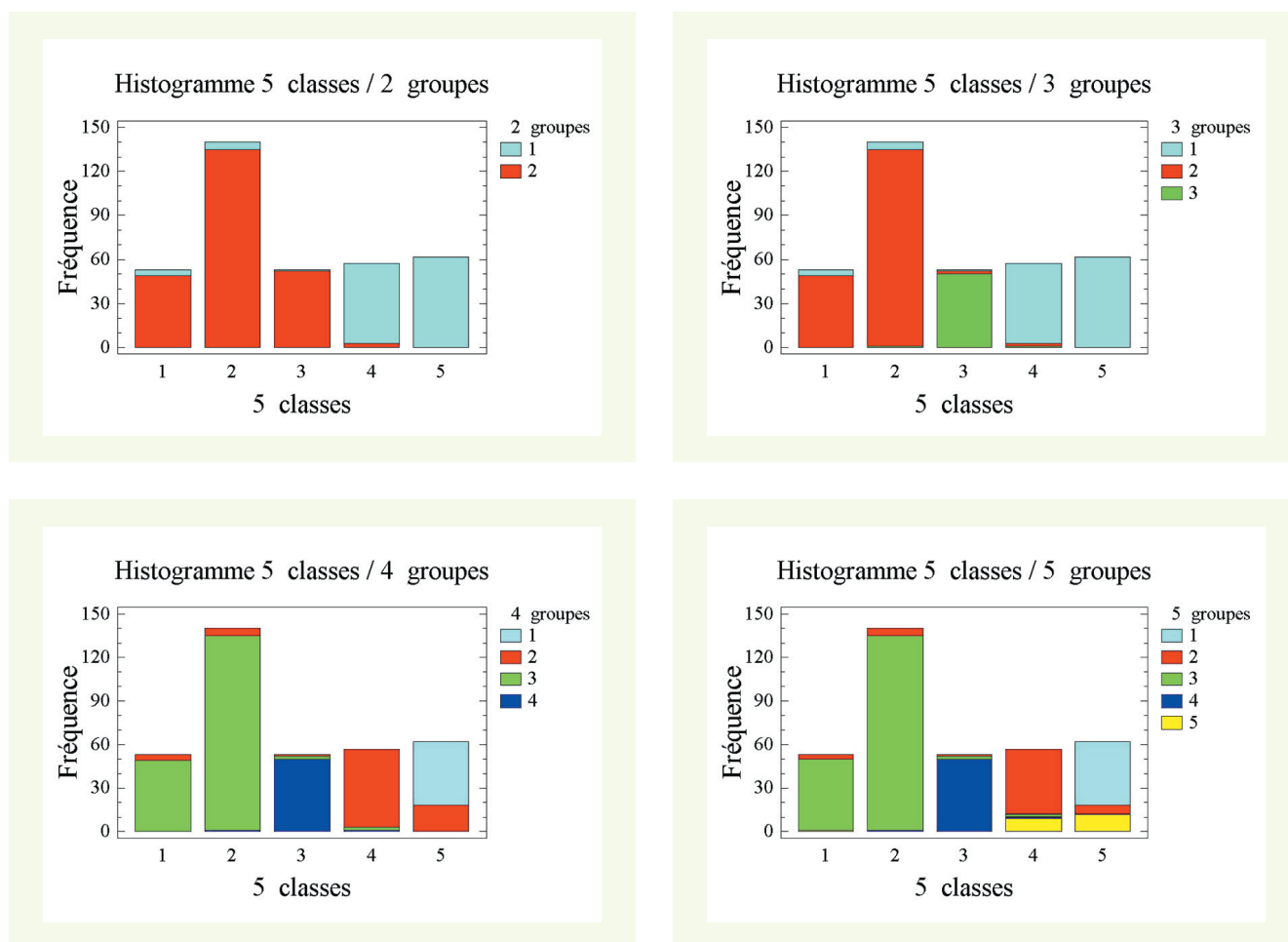


figure 3

Croisement des « classes » hebdomadaires avec les partitions en deux, trois, quatre et cinq « groupes ».

► Classement saisonnier

L'analyse a conduit à établir une distinction saisonnière en deux classes principales (« été » et « hors été »). Sur la base d'une comparaison par mois entiers, les meilleurs résultats ont été obtenus en définissant l'« été » comme l'ensemble des mois de juillet et août ; l'inclusion du mois de juin peut être envisagée également, mais non celle de septembre.

■ Conception générale du modèle

► Modèle de trafic

Le modèle retenu est exprimé par la formule suivante :

$$T_p(t) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{i=3} \alpha_i \exp(-\lambda_i(t - m_i)^2) + k \times SE \times N(p) \quad (1)$$

où

- $T_p(t)$ est la valeur prédite du flot de trafic, exprimé comme le rapport au trafic moyen horaire sur l'ensemble de l'année (nombre sans dimension),
- t est le temps, exprimé en heures décimales à partir de zéro heure pour le jour considéré,
- α_i représente le maximum d'une pointe et α_0 le niveau de base,
- m_i correspond à la valeur de t qui maximise la pointe,
- λ_i correspond à l'étalement de la pointe,
- k est un coefficient d'ajustement (constant),
- SE est l'écart type résiduel de la régression,
- p est la probabilité d'atteindre la valeur de T pour le temps t ,
- $N(p)$ est la valeur d'une variable aléatoire suivant une loi normale centrée réduite pour une probabilité p .

Pour chaque station, chaque sens et chaque type de jour, on peut définir le jeu de coefficients α , λ , m et SE , soit en tout onze paramètres.

L'estimation des onze paramètres peut être effectuée de deux façons :

- pour l'ensemble des onze paramètres, par régression non linéaire, dans un logiciel spécialisé (StatGraphics a été utilisé, mais d'autres peuvent également convenir) ou la fonction « solve » de MS-Excel ;
- pour les paramètres α , et SE , par régression linéaire multiple (possible dans MS-Excel), à partir d'une estimation des autres paramètres.

Le coefficient k dépend du pas d'échantillonnage des comptages de trafic servant au calcul (1 pour 6 min, 1,4 pour 1 h) ; l'expérience a cependant montré que de telles valeurs conduisaient à surestimer le trafic pour des valeurs élevées de p : sur les cas réels étudiés, k a été diminué afin de garder les valeurs de trafic dans un domaine réaliste.

► Classement des jours

L'analyse des données des quatre stations sur une année entière a conduit à définir deux classements, l'un hebdomadaire en quatre classes (précédemment défini), l'autre saisonnier en deux classes (juin à août et le reste de l'année).

► Feuille de calcul prototype

Le travail réalisé au cours de la première année du contrat (2002) a permis de fixer les bases du modèle de calcul des surcoûts (temps et consommation en carburant) pour l'usager dus aux chantiers d'entretien de la route ; l'année suivante a été consacrée à la mise au point d'une feuille de calcul « prototype ». Il ne s'agit toutefois pas à ce stade d'un logiciel prêt à être diffusé : même s'il a fait l'objet d'un début de validation, celle-ci n'a pas comporté de tests complets, et l'ergonomie est restée à un niveau élémentaire. De même, les données de base (par exemple la monétarisation des temps passés ou la consommation unitaire des véhicules) ont été tirées de la littérature technique, sans chercher à établir de consensus entre les pays représentés.

Chaque organisme chargé d'étudier un aspect particulier (voir chapitre « Présentation ») a créé sa propre feuille de calcul autonome, et le LAVOC a ensuite rassemblé les différentes feuilles dans un seul modèle « intégré » permettant le calcul global d'optimisation pour une section de route, avec simulation de plusieurs stratégies d'entretien sur une durée pouvant aller jusqu'à trente ans.

La **figure 4** reproduit le schéma du calcul pour le modèle des surcoûts supportés par l'usager sur un chantier donné (dans le modèle intégré, le modèle en question est appelé autant de fois qu'une opération générale d'entretien est programmée). La description complète des différents modèles est donnée dans le rapport produit par le groupe à l'issue de l'année 2003 [25]. Le calcul des coûts totaux suppose que l'on fournisse des coûts unitaires pour les temps de parcours (heure de VL et de PL) et les carburants. Dans les exemples qui suivent, ces coûts sont fondés sur les propositions du rapport Boiteux [7].

EXPÉRIMENTATIONS

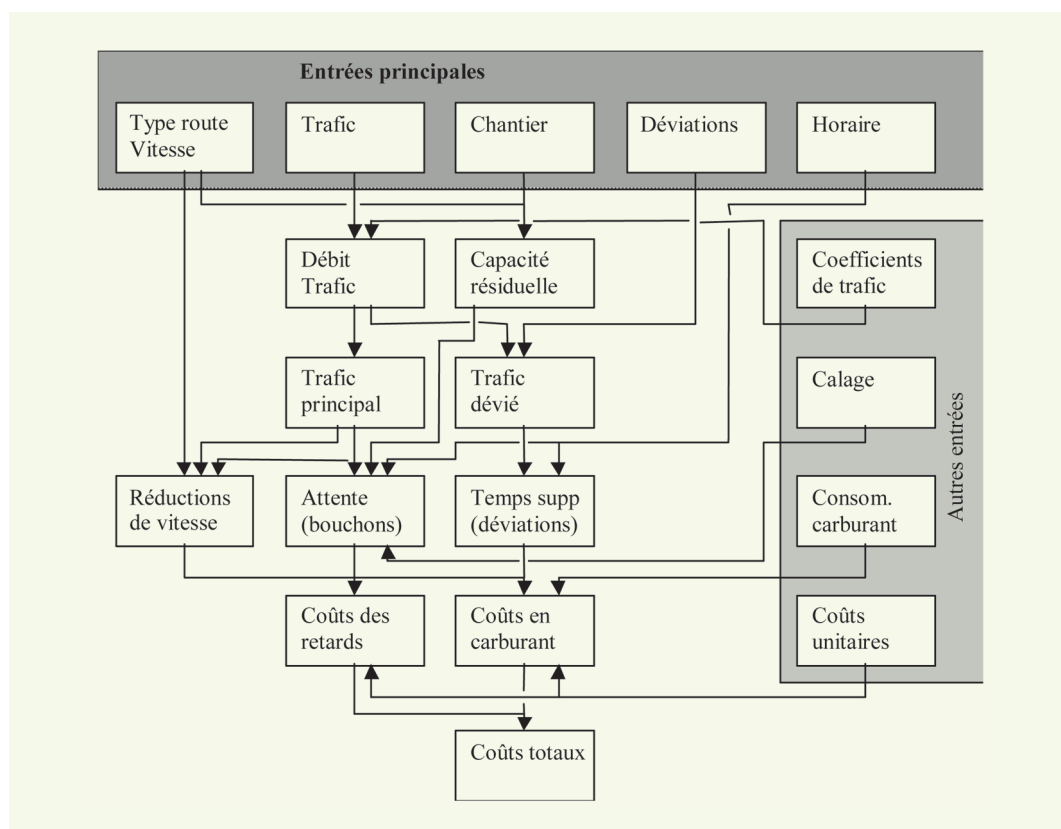
■ Programme

Après la conception générale du modèle et la réalisation de la feuille de calcul prototype, la troisième tâche consistait à valider le calcul sur la base de chantiers réels. Le LCPC a ainsi participé au programme expérimental sur cinq sites (quatre en France et un en Espagne), les autres étant situés en Slovénie, en Suisse et en Belgique, à la charge du partenaire local. Le **tableau 3** donne la liste des chantiers étudiés par le LCPC, dont la description complète figure dans le rapport produit par le groupe à l'issue de l'année 2004 [26].

Sur ces chantiers, un ensemble de données a été collecté : comptages détaillés de trafic pendant les travaux et en période normale, vitesses, temps de parcours, observation de la présence de bouchons, etc.

figure 4

Organisation générale
du calcul des surcoûts à
l'usager pour un chantier
donné.



Site	Profil	TMJA 2 sens	% PL	Voies ouvertes		Bascule- ment	Horaire	Déviations
				Sens 1	Sens 2			
Périph. Toulouse	2 × 3	100 000	5	Aucune	Toutes	Non	Nuit	Locale + Longue dist.
A7 (Espagne)	2 × 2	20 000	30	1	Toutes	Non	Journée	Aucune
				1	1	Oui	Journée	Aucune
A72	2 × 2	15 000	12	1	1	Oui	24 heures	Aucune
N 157	2 × 2	28 000	10	1	1	Oui	24 heures	Aucune
N 137	2 × 2	32 000	15	1	1	Oui	24 heures	Aucune

tableau 3

Liste des chantiers étudiés.

Ces données ont fourni des entrées au modèle, ainsi que des éléments de comparaison avec ses résultats.

L'évaluation économique, fondée sur des données observées (longueur de file d'attente, temps de parcours, vitesses) ou sur les résultats du modèle, tient compte :

- des temps passés par les véhicules légers et lourds, multipliés par un coût unitaire (valeurs issues du rapport Boiteux) ;
- des consommations en carburant supplémentaire des véhicules, fondées sur l'influence de la vitesse (y compris au ralenti) et les coûts unitaires.

Il convient de noter que d'autres aspects ne sont pas pris en considération dans cette évaluation : frais d'exploitation de véhicules autres que le temps et le carburant (par exemple les pneumatiques, l'huile, les pièces de rechange, etc.), augmentation des risques d'accidents (due aux travaux ou aux caractéristiques des déviations), inconfort des passagers, bruit, émissions polluantes, etc.

Seul le cas de la RN 137 est présenté dans ce qui suit ; en effet, l'expérience de Toulouse a déjà fait l'objet d'un article [13], et les cas de A7 et A72 n'ont donné lieu ni à l'observation ni à la prédiction

de bouchons ; celui de la RN 157 correspond au même type de chantier que la RN 137, mais s'en écarte notablement par la moindre ampleur des bouchons observés (et prédits).

■ Cas de la RN 137 (Nantes-Rennes)

› Contexte

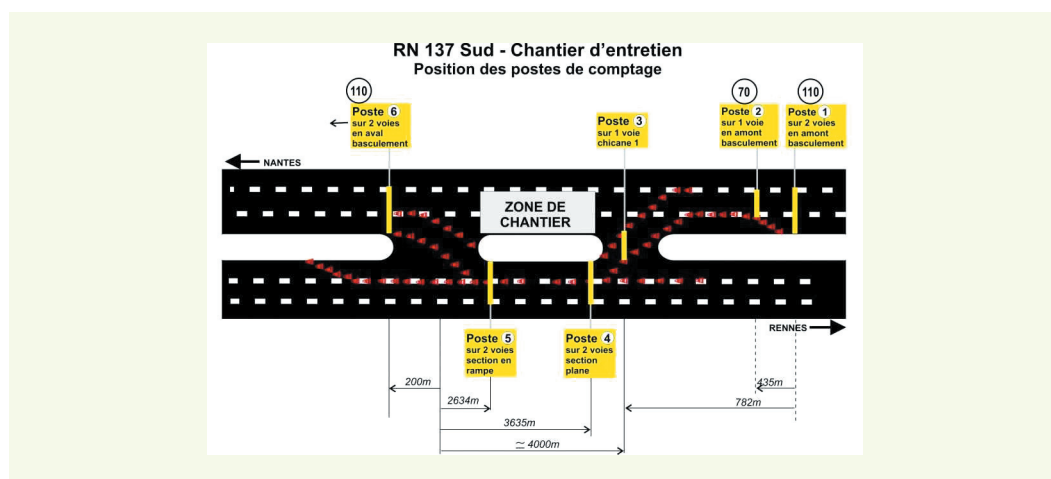
La route, dotée du statut de voie express, présente un profil à deux fois deux voies. Le trafic (TMJA) en 2002 était d'environ 30 000 véhicules par jour, dont environ 15 % de poids lourds. Le profil longitudinal comprend une pente à 5 % (descendant en direction du nord) sur 1 300 m. Le suivi du chantier et l'exploitation des résultats ont été réalisés par la division « Sécurité et techniques routières » (DSTR) du CETE de l'Ouest, avec la collaboration des services concernés au sein de la direction départementale de l'Équipement (DDE) d'Ille-et-Vilaine, dont le centre d'exploitation et d'intervention (CEI) de Bain-de-Bretagne [27].

Les travaux, réalisés du lundi 16 au vendredi 27 septembre 2002, consistaient en un rechargement (renouvellement de la couche d'usure par un enrobé avec fibres de 4 cm d'épaisseur plus un enrobé drainant de 4 cm) sur la totalité de la chaussée ouest, sur 4 km, avec un basculement de trafic sur la chaussée est, exploitée en mode bi-directionnel à deux voies. La durée des travaux était de deux semaines, soit dix jours effectifs, sans réouverture pendant la nuit ni le week-end. Aucune déviation n'était indiquée, sauf pour le trafic utilisant des bretelles d'entrée et de sortie du côté ouest. La vitesse maximale autorisée sur la route était de 110 km/h ; sur le chantier, elle était réduite à 90 km/h, et à 50 km/h dans les zones de chicane.

› Données relevées

La station SIREDO la plus proche du chantier se situe à Bain-de-Bretagne, à 25 km des travaux, ce qui permet une analyse fine des variations du trafic, mais l'estimation du trafic total est donnée par deux stations secondaires situées de part et d'autre du chantier. Les comptages de 2002 donnent respectivement en TMJA 23 427 v/j à Bain-de-Bretagne, 28 206 v/j au sud du chantier et 36 384 v/j au nord de celui-ci. De plus, le chantier a été équipé de différents postes de comptage temporaires, comme indiqué sur la **figure 5**, donnant le trafic par période de six minutes, ainsi que les vitesses pour les VL et PL.

figure 5
Disposition du chantier et
des stations de comptage.



Le 19 septembre 2002, dans un véhicule léger équipé d'un système d'enregistrement en continu des distances parcourues et des vitesses, deux agents du CETE de l'Ouest ont réalisé neuf passages dans chaque sens sur une section d'environ 16,5 km englobant la zone de travaux. L'exploitation des données recueillies a permis de constater, dans le sens Nantes-Rennes :

- que le temps perdu est homogène et de l'ordre d'une minute et demie lorsque la circulation est fluide ;
- que ce temps peut être considérablement augmenté en période de saturation (+ 7 min sur les deux derniers passages), un bouchon se formant alors dans la zone de rétrécissement de deux à une voie.

Dans l'autre sens, les passages ayant tous été exécutés dans des conditions de circulation fluide, les résultats obtenus sont homogènes : ils conduisent à un temps perdu moyen de l'ordre de 40 s lié aux limitations de vitesse. Cette différence peut être attribuée à l'influence, d'une part, de la déclivité (montée dans le sens Rennes-Nantes et inversement) et, d'autre part, de l'absence de chicane dans le sens Nantes-Rennes (simple rabattement de deux à une voie sans changement de trajectoire).

La comparaison de ces données avec les observations établies par les agents du CEI de Bain-de-Bretagne a conduit aux constats suivants :

- chaque jour de semaine, des perturbations significatives de circulation ont été enregistrées à chacune des extrémités du chantier aux heures de pointes du matin et du soir ;
- dans le sens Rennes-Nantes, les perturbations les plus importantes commencent vers 16 h 30 et durent jusqu'à 19 h 30, voire 20 h ; il y a une bonne corrélation entre les constats visuels (faits uniquement le soir dans ce sens) et les périodes de chute significative des vitesses ; le matin, les données fournies par les seuls capteurs routiers font apparaître des ralentissements significatifs entre 8 h et 10 h ;
- dans le sens Nantes-Rennes, l'emplacement des compteurs ne permet pas d'identifier correctement les périodes perturbées ; les constats visuels, faits uniquement le matin en semaine dans ce sens, montrent pratiquement chaque jour l'existence de bouchons entre 7 h 30 et 9 h 30, pouvant persister jusqu'à 10 h 30 ou 11 h ; des bouchons ont même été notés le dimanche soir.

Menée pour le sens Rennes-Nantes, l'analyse fine et comparée des vitesses instantanées enregistrées au même moment sur les divers postes montre que les perturbations importantes prennent naissance au niveau du poste 3, c'est-à-dire au début du basculement (chicane). Ces perturbations se répercutent ensuite très rapidement en amont au niveau des postes 2 et 1, puis en aval sur le poste 4. En revanche, la rampe située au niveau du poste 5 ne semble pas avoir d'influence sur les conditions de circulation en amont (mais elle semble en avoir sur la durée de traversée de la zone en chantier).

La méthode de calcul théorique [28, 29] par le facteur d'heure de pointe instantané a conduit à retenir une valeur de la capacité résiduelle dans le sens du basculement de l'ordre de 1 080 UVP/h.

► Évaluation de la gêne apportée aux usagers par le chantier

En combinant les diverses données recueillies (résultats de comptage, observations sur les bouchons, mesures de temps de parcours), il est possible de quantifier le temps perdu par les usagers traversant la zone concernée par les travaux, par rapport à une situation normale sans restriction.

La méthode choisie comporte les étapes suivantes :

- par sens de circulation, identification des périodes selon l'état de la circulation (fluide, dense, saturée) ;
- dénombrement des véhicules (avec distinction VL et PL) qui ont traversé la zone de travaux pour chacune des périodes identifiées ci-dessus ;
- affectation à chaque période d'une augmentation moyenne de la durée de traversée.

À partir des résultats obtenus lors des mesures de temps de parcours, les valeurs suivantes ont été retenues :

- en circulation « fluide », 1 min 30 s (sens Rennes => Nantes) et 45 s (sens Nantes => Rennes) ;
- en circulation « saturée », 6 à 10 min selon les longueurs de bouchons observées ;
- en circulation « dense », des valeurs intermédiaires entre les valeurs ci-dessus.

L'application de cette méthode à la journée du 19 septembre 2002 fournit les résultats présentés dans le **tableau 4** (pour simplifier, il a été fait abstraction des courtes périodes de circulation « dense » et plus ou moins ralentie qui précèdent le passage à une situation de saturation).

Le temps perdu par l'utilisateur n'est donc pas négligeable (jusqu'à 10 min, soit plus de 10 % de la durée normale entre Rennes et Nantes) ; le **tableau 5** donne le nombre d'heures perdues pour la seule journée du jeudi 19 septembre 2002 (jour ouvrable « moyen »).

tableau 4
Évaluation de la gêne
à l'usager.

Périodes	État de la circulation	Augmentation moyenne de la durée de parcours	Nombre de véhicules		Temps perdu (min)	
			VL	PL	VL	PL
a) Sens Rennes → Nantes						
0 h/8 h	fluide	1 min 30 s	1 452	701	2 178	1 052
8 h/10 h	saturée	6 min	1 675	425	10 050	2 550
10 h/17 h	fluide	1 min 30 s	5 360	1 568	8 040	2 352
17 h/19 h 42	saturée	10 min	2 702	488	27 020	4 880
19 h 42/24 h	fluide	1 min 30 s	1 629	397	2 444	600
Totaux			12 818	3 579	49 732	11 435
b) Sens Nantes → Rennes						
0 h/7 h 42	fluide	45 s	1 360	526	1 020	395
7 h 42/9 h 30	saturée	8 min	2 146	278	17 168	2 224
9 h 30/24 h	fluide	45 s	7 869	3 000	5 902	2 250
Totaux			11 375	3 804	24 090	4 869

tableau 5
Évaluation du temps
perdu total.

	Temps perdu le 19/09/2002 (en heures)		
	Véhicules légers	Poids lourds	Total
Sens Rennes - Nantes	829	190	1 019
Sens Nantes - Rennes	402	82	484
Total	1 231	272	1 503

À partir des coûts unitaires définis dans les méthodes françaises d'évaluation économique [7], cette gêne peut être monétarisée :

- coût de l'heure pour un véhicule léger : 25 €/h,
- coût de l'heure pour un poids lourd : 41,5 €/h.

On obtient une valeur de : $25 \text{ €/h} \times 1\,231 \text{ h} + 41,5 \text{ €/h} \times 272 \text{ h} = 42\,063 \text{ €}$.

Si l'on considère la journée du 19 septembre comme représentative des jours de semaine et si l'on néglige le temps perdu pendant les week-ends, alors la gêne globale apportée par les seuls travaux sur chaussée peut être évaluée à :

$$42\,063 \text{ €} \times 18 \text{ jours} \sim 757\,000 \text{ €}.$$

Ce chiffre est à rapprocher du montant du marché pour ces mêmes travaux, à savoir 938 000 euros.

Sur ce chantier, la gêne causée aux usagers par les restrictions de circulation mises en place représente donc un coût collectif dont le montant est de l'ordre de 80 % des dépenses directes consacrées aux travaux, sans compter les autres surcoûts subis par l'utilisateur (risques supplémentaires d'accidents, surconsommation en carburant), ni les coûts environnementaux.

► Application du modèle FORMAT

Le modèle décrit précédemment suppose que l'on calcule les paramètres d'évolution du trafic sur la base de comptages détaillés (si possible par tranches horaires sur une année complète). La station SIREDO de Bain-de-Bretagne, située à 25 km du chantier, a servi à calculer ces paramètres (tableau 6). Pour les poids lourds, aucun comptage détaillé permanent n'étant disponible, les données implicites du modèle (issues d'un cas moyen de route nationale) ont été conservées.

tableau 6
Coefficients de trafic du
modèle FORMAT selon la
formule (1).

	Lun/ Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche/ fêtes	Lundi/ Jeudi été	Vendredi été	Samedi été	Dimanche/ fêtes été
Nord								
α_0	0,110	0,134	0,156	0,146	0,172	0,193	0,268	0,270
α_1	1,367	1,145	0,000	0,000	1,073	0,873	0,000	0,000
λ_1	0,504	0,530	0,000	0,000	0,753	0,854	0,000	0,000
m_1	8,284	8,337	0,000	0,000	8,113	8,132	0,000	0,000
α_2	1,166	1,354	1,202	1,158	1,419	1,516	1,410	1,329
λ_2	0,056	0,045	0,162	0,278	0,085	0,077	0,189	0,283
m_2	11,576	13,043	10,836	11,486	10,916	11,693	10,854	11,402
α_3	1,626	2,148	1,500	2,207	1,769	2,572	1,978	2,301
λ_3	0,125	0,126	0,059	0,082	0,084	0,082	0,042	0,054
m_3	18,054	18,454	16,933	18,397	17,660	18,094	16,340	18,795
k*SE	0,193	0,225	0,217	0,344	0,184	0,267	0,337	0,290
Coef PL	1,300	1,100	0,500	0,250	1,300	1,100	0,500	0,250
Sud								
α_0	0,105	0,121	0,186	0,151	0,119	0,166	0,348	0,228
α_1	1,307	1,069	0,000	0,000	1,762	1,933	0,000	0,000
λ_1	0,194	0,188	0,000	0,000	0,113	0,085	0,000	0,000
m_1	8,730	8,937	0,000	0,000	9,508	10,520	0,000	0,000
α_2	1,138	1,615	1,477	1,175	1,428	0,535	2,428	1,814
λ_2	0,030	0,031	0,177	0,205	0,047	0,761	0,148	0,182
m_2	14,895	15,650	10,614	11,190	16,595	14,764	10,390	10,802
α_3	1,146	1,489	1,213	2,064	0,700	2,666	1,387	1,953
λ_3	0,308	0,249	0,058	0,081	0,517	0,096	0,059	0,067
m_3	18,429	18,553	16,653	18,319	18,512	18,078	16,291	18,488
k*SE	0,254	0,278	0,260	0,392	0,182	0,256	0,340	0,242
Coef PL	1,300	1,100	0,500	0,250	1,300	1,100	0,500	0,250

Il a été considéré également que le trafic observé en temps normal devait être représentatif de la demande lors du chantier car :

- aucune déviation n'était signalée aux usagers (sauf pour les bretelles d'entrée et de sortie fermées),
- les déviations locales possibles allongeaient les distances ou empruntaient des routes étroites,
- les itinéraires alternatifs n'existaient que pour de très longues distances.

La **figure 6** compare les résultats de la simulation du trafic aux comptages réels effectués sur chantier ; elle montre un bon accord, sauf pour quelques valeurs anormalement basses le mercredi 18 après-midi (un accident a été signalé à 16 h 55) et une légère avance du pic de trafic de l'après-midi (les automobilistes auraient-ils quitté leur travail plus tôt afin d'éviter les bouchons ?).

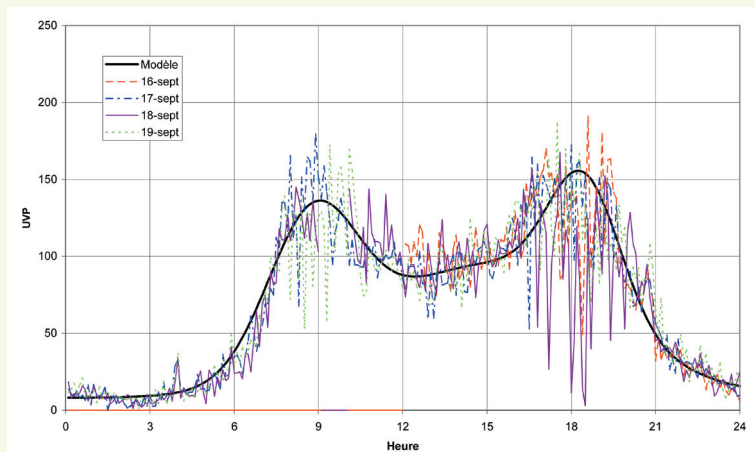
➤ Résultats de l'expérience

Le modèle fournit de bonnes prévisions quant à l'apparition des bouchons mais, dans l'ensemble, il tend à surestimer leurs conséquences exprimées en temps perdu. La prévision de la demande de trafic donne de bons résultats, mais elle ne peut évidemment pas tenir compte des réactions des usagers (qui avancent ou reportent leur trajet afin d'éviter les bouchons) ou des coupures imprévisibles.

Le **tableau 7** récapitule les résultats des observations et des différents modèles.

figure 6

Comparaison entre trafic réel (poste 2, lundi 16 au jeudi 19 septembre 2002) et simulation (en direction du sud, jours de semaine hors été, probabilité 50 %).



Temps perdu	Sens	Sud				Nord			
	Période	VL	PL	UVP	Tous	VL	PL	UVP	Tous
Observé (voir tableau 4)	1 (fluide)	2 178	1 052	3 861	3 230	1 020	395	1 652	1 415
	2 (bouchon)	10 050	2 550	14 130	12 600	17 168	2 224	20 726	19 392
	3 (fluide)	8 040	2 352	11 803	10 392	5 902	2 250	9 502	8 152
	4 (bouchon)	27 020	4 880	34 828	31 900				
	5 (fluide)	2 444	600	3 404	3 044				
	Total F (min)	12 662	4 004	19 068	16 666	6 922	2 645	11 154	9 567
	Total B (min)	37 070	7 430	48 958	44 500	17 168	2 224	20 726	19 392
	Total F (h)	211	67	318	278	115	44	186	159
	Total B (h)	618	124	816	742	286	37	345	323
	Total	829	191	1 134	1 019	402	81	531	483
Modèle probabiliste	Fluide	347	51	429	398	344	51	426	395
	Bouchon	7 911	1 916	10 977	9 827	927	225	1 287	1 152
	Total	8 258	1 967	11 405	10 225	1 271	276	1 713	1 547
Modèle déterministe	Fluide	347	51	429	398	344	51	426	395
	Bouchon	3 129	887	4 548	4 016	927	95	489	432
	Total	3 476	938	4 977	4 414	680	146	915	827
Temps passé en bouchon									
Observé	Maxi				8 min 30				1 min 10
Modèle probabiliste	Référence				37 min 41				6 min 51
Modèle déterministe	Référence				21 min 53				4 min 36
Durée du bouchon									
Observée					5 h 30				2 h 06
Modèle probabiliste					11 h 30				4 h 42

tableau 7

Comparaison des résultats des modèles pour le jeudi 19 septembre 2002.

■ Conclusions sur l'application du modèle

➤ Modélisation de la demande de trafic

Pour une bonne utilisation du modèle, il faut pouvoir disposer :

- d'un jeu de coefficients (qui déterminent la répartition temporelle du trafic) représentatif du cas considéré ;
- de la valeur du trafic moyen journalier (TMJA), valable pour l'emplacement exact du chantier et l'année considérée.

En effet, les coefficients peuvent rester les mêmes le long d'un itinéraire ou sur différents itinéraires de mêmes caractéristiques (d'où l'intérêt d'une typologie des routes, étudiée au paragraphe suivant), alors que le niveau général de trafic peut varier d'une façon importante d'une section à l'autre.

Si l'on dispose de ces données, la prévision de trafic par le modèle s'avère tout à fait conforme aux comptages réels. Il va de soi cependant que des facteurs perturbateurs, par nature, imprévisibles, peuvent intervenir : accidents, incidents de chantier ou changements dans le comportement de l'utilisateur, qui tend à fuir ou à anticiper de telles situations.

➤ Prévision des bouchons

La prévision des bouchons est très sensible à la valeur de la capacité résiduelle de la route en travaux, mais ce paramètre n'est pas toujours facile à prévoir avec la précision souhaitée ; la solution idéale consiste en un calage expérimental, qui n'est évidemment possible que si la situation de bouchon est atteinte dans les conditions réelles du chantier.

En conséquence, la prévision ne peut en général être faite que sur la base de la littérature technique [28] ou de l'analyse de cas semblables. Dans des conditions d'exploitation analogues, la capacité résiduelle peut être sensiblement différente d'un site à un autre et s'éloigner des valeurs de référence retenues dans le modèle. Si l'évaluation de la capacité résiduelle est bonne, l'apparition des bouchons (ou leur absence) est bien prédite par les modèles, mais il n'en est pas toujours de même pour les conséquences exprimées en temps d'attente ; ceci peut être attribué :

- aux réactions de l'utilisateur ;
- à certains paramètres qui seraient à vérifier et à caler (coefficient de dispersion, équivalence des poids lourds, etc.) ;
- au caractère probabiliste du modèle, qui attribue un poids (faible mais non négligeable) à des cas extrêmes.

Ce dernier point pourrait conduire à diminuer le coefficient de dispersion des prédictions de trafic dans ce modèle.

➤ Évaluation économique

Le coût économique des pertes de temps subies par l'utilisateur reste faible tant que l'apparition des bouchons est peu probable, mais ce coût augmente rapidement dès que cette probabilité devient significative.

Parmi les cas étudiés, seul celui de la RN 137 fait apparaître des bouchons importants et renouvelés, que les modèles auraient permis de prédire (à condition de disposer d'une bonne évaluation *a priori* de la capacité résiduelle).

Ainsi, dans tous les autres cas, le coût économique de la gêne à l'utilisateur reste faible par rapport à celui des travaux (au maximum quelques pour-cent) ; au contraire, si des bouchons apparaissent de façon répétée, le coût du temps perdu augmente rapidement et peut dépasser l'ordre de grandeur du coût direct des travaux. Le cas du périphérique de Toulouse est intéressant à cet égard : la simulation montre que toute solution autre que le travail de nuit aurait conduit à des temps d'attente inacceptables [13].

Le surcoût économique en carburant n'est significatif qu'en cas d'allongement de parcours ou de bouchon ; il est alors grossièrement proportionnel à celui du temps perdu, dans un rapport d'environ 20 %.

APPLICATION À UN RÉSEAU

■ Objectif : établir une typologie

➤ Principes

Dans le paragraphe précédent, on a vu comment il était possible d'appliquer le modèle à un cas unique pourvu d'un jeu complet de données (c'est ce que l'on désigne habituellement comme le « niveau projet »). Lorsque l'on désire appliquer le même principe au « niveau réseau », les choses

deviennent un peu différentes, car il est en pratique impossible de disposer de données très détaillées (comme ici les comptages SIREDO) en tout point de n'importe quel itinéraire. Pour appliquer le modèle à une section précise, il faut donc pouvoir fixer à partir de cas semblables les valeurs des paramètres caractérisant les variations journalières, hebdomadaires et saisonnières du trafic.

Cette partie du travail, achevée après la clôture du projet FORMAT, a utilisé des données échantillonnées sur l'ensemble du réseau national français. Elle a consisté à établir une typologie à partir de critères simples tels que le type de voie ou la localisation. Le calcul des coefficients, ainsi qu'une première analyse des résultats, ont été réalisés [30].

› Données

Afin de disposer d'un échantillonnage étendu et représentatif du réseau national, le choix a été fait parmi toutes les stations SIREDO disponibles (de l'ordre de 2 000), en appliquant autant que possible le critère suivant : deux stations par département sur deux itinéraires différents. Compte tenu de leurs spécificités, les départements d'Île-de-France et de Corse n'ont pas été étudiés. En tout, 169 stations ont été retenues, dont 148 se sont révélées exploitables, réparties sur des routes nationales ou des autoroutes (figure 7), soit 296 « individus » en considérant séparément les deux sens de circulation.

figure 7
*Emplacement
des stations étudiées.*



Les résultats des comptages ont été fournis sous forme d'un fichier Microsoft Access par le CETE Méditerranée (qui assure la coordination et la gestion des données SIREDO au niveau national). Pour toutes les stations, les huit types de jours et les deux directions, l'ensemble des coefficients a été calculé par régression non linéaire.

À l'issue de ce travail, un fichier a été créé, comportant 68 « variables à expliquer » (les dix coefficients pour les quatre types de jours ouvrés et les sept coefficients des quatre types de jours de week-ends et fêtes), pour 296 « individus » caractérisés par des « variables explicatives » :

- la région administrative ;
- le département ;

- le trafic total 2002 (TMJA) ;
- la direction géographique (quatre modalités, correspondant aux points cardinaux) ;
- « Paris/province » (trois modalités : « vers Paris », « vers la province » ou « indifférent ») ;
- « terre/mer » (trois modalités : « vers la terre », « vers la mer » ou « indifférent ») ;
- « ville/campagne » (trois modalités : « vers la ville », « vers la campagne » ou « indifférent ») ;
- le « type » de route (trois modalités : « 2 voies », « 2 × 2 voies » ou « autoroute ») ;
- la « fonction » selon cinq modalités :
 - VRU pour « voie rapide urbaine »,
 - VCA pour « voie à caractère autoroutier »,
 - GLAT pour « grande liaison d'aménagement du territoire »,
 - RNL pour « route nationale de liaison »,
 - RNO pour « route nationale ordinaire ».

■ Analyse

➤ Calcul des axes et recherche des variables explicatives pertinentes

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur soixante-quatre variables et 257 individus, retenus après élimination de quatre variables jugées redondantes et de trente-huit individus présentant des valeurs atypiques.

La fonction « multiple range test » de l'analyse de variance dans StatGraphics a permis de détecter s'il existait, pour une variable continue (ici l'un des quatre premiers axes factoriels) des contrastes entre modalités d'une variable discrète. Cette méthode est fondée sur un test d'« égalité des moyennes » de chaque paire de modalités selon un « niveau de confiance » de 95 % : par exemple, il existe 190 « paires » de régions (Alsace-Aquitaine, Alsace-Bourgogne, etc.) et, parmi ces paires, seulement trois présentent un contraste significatif selon ce critère pour la coordonnée sur l'axe 1.

Le **tableau 8** indique le nombre de contrastes significatifs entre modalités et le coefficient de régression pour la variable continue représentative du trafic.

tableau 8
Nombre de contrastes significatifs entre modalités (et corrélation avec le trafic) pour les quatre premiers axes factoriels.

Variable	Nombre total de paires	Nombre de contrastes significatifs			
		Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4
Région	190	3	28	59	7
Paris/province	3	0	0	0	0
Terre/mer	3	0	0	0	0
Ville/campagne	3	2	2	2	2
Type	3	2	0	1	1
Fonction	10	5	5	7	6
		Coefficient de régression R ²			
Log(trafic)		0,006	0,001	0,062	0,044

Il en ressort que deux classements semblent pertinents :

- le classement direction ville / direction campagne,
- le classement type ou fonction (les deux étant corrélés).

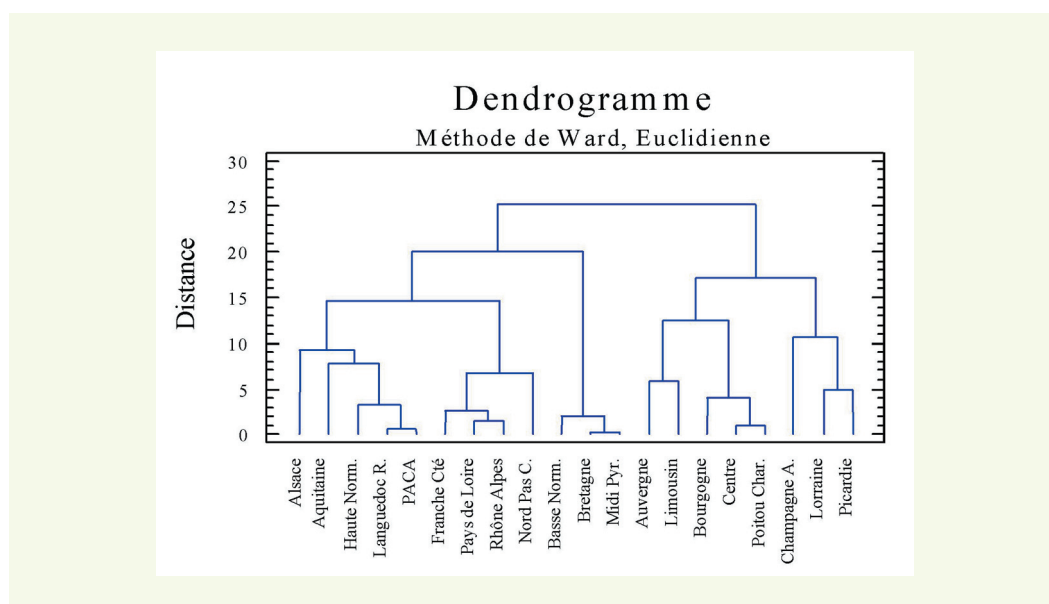
En revanche, les variables Paris/province et terre/mer semblent ne rien donner, de même que le trafic.

Le classement par régions en tant que tel ne peut pas être utilisé (seul l'axe 3 montre un nombre important de contrastes), mais on verra que sa pertinence peut être améliorée en procédant à des regroupements.

› Regroupement des régions

L'analyse des écarts aux moyennes des classes fondées sur la direction ville/campagne et le type permet de rechercher d'éventuels autres effets, et particulièrement de regrouper les régions administratives en ensembles géographiques continus. À cette fin, une classification ascendante hiérarchique (CAH) a été calculée à partir des moyennes des écarts, pour chacune des vingt régions concernées et les quatre premiers axes factoriels. La **figure 8** présente le résultat sous la forme d'un dendrogramme.

figure 8
Dendrogramme de
regroupement des régions.



Si l'on se contente des régions ayant une limite commune, on peut énoncer les rapprochements suivants :

- Languedoc-Roussillon avec PACA,
- Franche-Comté avec Rhône-Alpes,
- Bretagne avec Basse-Normandie,
- Auvergne avec Limousin,
- Bourgogne avec Centre et Poitou-Charentes.

Si l'on regroupe des régions non contiguës, des rapprochements inattendus apparaissent, auxquels il est difficile de trouver des explications, et qui peuvent parfaitement être fortuits, compte tenu de la faiblesse de certains effectifs.

Au vu de ces résultats, deux classements cohérents seulement peuvent être définis (**figure 9**) :

- celui qui ne prendrait en compte que les premiers regroupements, ce qui donne douze classes au lieu de vingt, avec six régions non regroupées (Alsace, Aquitaine, Haute-Normandie, Pays-de-Loire, Nord-Pas-de-Calais, Midi-Pyrénées) ;
- le classement binaire, suivant les deux branches principales, qui oppose les régions « centrales » aux régions « périphériques ».

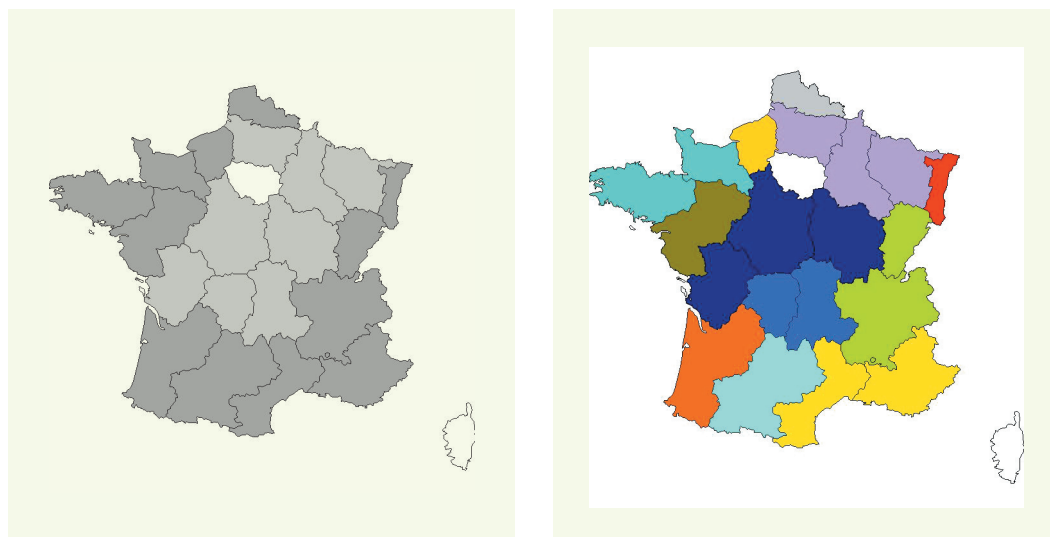
■ Résultats

› Typologie

Ce travail a permis de sélectionner les variables de classement les plus pertinentes, qui sont :

- la direction ville/campagne (trois modalités : vers la ville, vers la campagne ou indifférent) ;
- le type de voie (trois modalités : 2 voies, 2 × 2 voies, autoroute) ;
- la région.

figure 9
Carte du regroupement des
régions en deux et douze
zones.



Pour ce dernier paramètre, il est souhaitable de regrouper les vingt régions administratives en un nombre réduit de zones continues, mais les nombres « optimaux » de telles zones, tels qu'ils ressortent de l'analyse, sont soit deux, soit douze.

› Coefficients poids lourds

La classification a été établie sur la base des comptages « tous véhicules », alors que logiquement il aurait fallu travailler sur des trafics « équivalents » (exprimés en UVP), mais les comptages par catégorie de véhicules ou par longueur n'étaient pas disponibles pour l'ensemble des stations étudiées. Il est cependant apparu utile d'analyser ces comptages lorsqu'ils étaient disponibles, afin de :

- vérifier l'absence de biais dus à l'incidence des PL,
- fournir pour chaque catégorie une valeur moyenne des coefficients PL.

Rappelons qu'il s'agit de coefficients sans dimension, traduisant la répartition du trafic lourd sur les huit types de jours de l'année. Dans le modèle, le taux de PL est obtenu en multipliant ces coefficients par le taux moyen annuel (qui est une donnée de base).

Il est apparu que, parmi les 296 stations soumises à l'analyse (en comptant chacun des deux sens), 139 (soit un peu moins de la moitié) disposaient de comptages spécifiques permettant de distinguer les poids lourds, ce qui a permis de compléter les tableaux caractérisant les différents cas identifiés. Les profils ainsi obtenus sont d'ailleurs assez voisins.

■ Application au cas de la RN 137

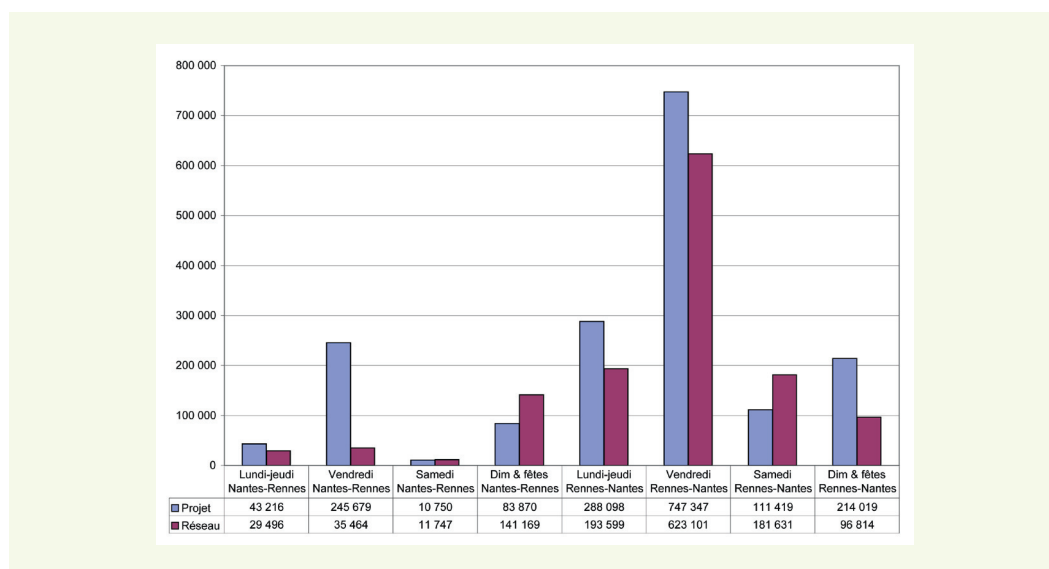
Précédemment, le modèle a été appliqué à un chantier réel sur la RN 137 entre Nantes et Rennes en septembre 2002, où les caractéristiques des bouchons observés ont été relevées. Les variations de trafic ont été calculées à partir des comptages de la station SIREDO implantée à Bain-de-Bretagne, sur le même itinéraire mais 25 km plus au sud (remarquons que cette station n'a pas été prise en compte dans l'analyse). Il a été constaté que le modèle prédisait assez bien l'apparition des bouchons, mais en exagérait l'importance ; il restait à examiner si l'approche « réseau » s'appliquait bien à ce cas particulier bien étudié, procédant de l'approche « projet ».

Pour cela, la comparaison a porté sur les résultats :

- de l'approche « réseau » fondée sur le jeu de coefficients applicable au « type » considéré, c'est-à-dire la moyenne des stations regroupées sous la même définition à l'issue de l'analyse : « région périphérique, route à 2 x 2 voies », direction « ville » vers le nord et « campagne » vers le sud ;
- de l'approche « projet » fondée sur les coefficients issus de la seule station « Bain-de-Bretagne ».

figure 10
Application du modèle au
cas de la RN 137 -
Coût des attentes par jour,
en euros.

La **figure 10** présente les résultats de ce calcul. On constate bien sûr des différences, mais les ordres de grandeur sont respectés, notamment celui du vendredi dans le sens Rennes-Nantes ; seul le vendredi dans le sens Nantes-Rennes montre un écart important.



CONCLUSION

Le travail présenté constitue un des éléments nécessaires à une optimisation complète de l'entretien routier prenant en compte le point de vue de l'utilisateur, et notamment les inconvénients qu'il doit endurer du fait des travaux.

Le modèle probabiliste développé dans le cadre du projet FORMAT permet de calculer le temps perdu par les usagers, en fonction des caractéristiques du chantier : type de fermeture, vitesse pratiquée au droit du chantier et de ses abords, durée et horaire des fermetures de voies, caractéristiques des éventuelles déviations. Il utilise un ensemble de coefficients permettant de prédire à tout instant le niveau de trafic, pour une probabilité donnée, en tenant compte des variations journalières, hebdomadaires et saisonnières propres au cas considéré.

Un programme expérimental sur cinq cas de chantiers réels a permis de valider globalement la méthode : la prédiction des bouchons est bien conforme aux cas observés, mais le modèle tend à surestimer le nombre d'heures perdues, dans la mesure où il ne prend pas en compte les réactions des usagers (qui peuvent adapter leurs horaires ou éviter d'emprunter l'itinéraire). Les calculs économiques ont montré que l'incidence sur le coût global de l'entretien peut être négligeable (si la conséquence pour l'utilisateur se limite à une réduction de vitesse sur moins d'un kilomètre) ou importante, voire même considérable, dès que des files d'attente sont susceptibles de se former. Les dispositions optimales à prendre pour limiter ces effets dépendent bien sûr du niveau de trafic et de sa répartition temporelle : travail de nuit, déviations, basculement de chaussée, fermeture de voie, etc. La possibilité d'étendre au niveau d'un réseau cette approche « projet » a été étudiée ; pour cela, une analyse typologique des coefficients de variations de trafic a permis d'identifier un certain nombre de cas typiques rencontrés sur l'ensemble du réseau national français.

Afin de rendre le modèle utilisable en gestion de l'entretien routier, il reste à le rendre opérationnel ; à cette fin, deux voies (non exclusives) peuvent être envisagées.

- ① La première consisterait à « finaliser » le modèle, en transformant l'actuelle feuille de calcul prototype en un logiciel autonome, possédant une interface utilisateur « professionnelle », et si nécessaire des liens avec les autres outils informatiques (tel que GiRR) dont dispose actuellement le gestionnaire de la route.

- ② La seconde viserait à appliquer le modèle sur un grand nombre de cas types, en vue, d'une part, de définir des règles de choix pour la configuration des chantiers et leur calendrier, et, d'autre part, d'évaluer leurs conséquences en temps perdu, afin d'affecter des « surcoûts usager » au coût direct des travaux dans les systèmes d'aide à la gestion (comme le futur programme SAGIR).

REMERCIEMENTS

Le présent rapport est une synthèse, qui inclut des résultats de plusieurs types d'études, notamment des travaux d'étudiants effectuant un stage au LCPC ou des expérimentations réalisées par les CETE, avec le concours d'entreprises et des gestionnaires routiers. On trouvera dans la liste bibliographique en fin de document les références complètes de ces travaux.

Parmi les personnes ayant contribué à ce travail, l'auteur souhaite mentionner particulièrement :

- Philippe Lepert, directeur de recherche au LCPC, qui a piloté ces travaux à la fois comme responsable direct et comme président du « Work Package 4 » du projet FORMAT ;
- Sébastien Siaudeau, étudiant à l'institut de mathématiques appliquées (IMA) à Angers, qui a effectué deux stages (maîtrise en 2002 et DESS en 2003) au LCPC ; ces travaux ont servi à la conception du modèle ;
- Angélique Guibert, étudiante à l'IMA, qui a effectué un stage au LCPC (DESS en 2004), et dont les résultats ont permis de définir la typologie des routes ;
- Jean-Marie Marion, directeur de l'IMA, qui a suivi le travail de ces deux étudiants, et nous a conseillé pour le choix des méthodes de traitement statistique des données ;
- Frédéric Pesteil, du CETE du Sud-Ouest, auteur du logiciel ECCU dont certains principes ont été repris dans le modèle ;
- Robert Abadie et Éric Floch, du CETE de l'Ouest, ainsi que les responsables de la DDE d'Ille-et-Vilaine, qui ont ensemble réalisé les expérimentations des RN 137 et 157 ;
- tous les collègues de la division Entretien, sécurité et acoustique des routes (ESAR) qui ont participé aux mesures et à leur exploitation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **FORMAT** (Fully Optimised Road MAInTenance), Commission Européenne, cinquième programme-cadre, programme Growth, rapport final et guide d'intégration, **2005**.
- 2 **MICHAUT J.-P., BALAY J.-M., KERZREHO J.P.**, Projet européen FORMAT, comparaison de techniques d'entretien, *Revue générale des routes et aérodromes*, **827** et **830**, avril et juin **2004**.
- 3 **FERNE B.**, Continuous Pavement Deflection Profiles, European Experience FORMAT, *TRB annual meeting, Workshop 102*, janvier **2005**.
- 4 **SIMONIN J.-M.**, Évaluation du High Speed Deflectometer, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **260**, janvier-février-mars **2006**.
- 5 **AIPCR**, The Highway Development and Management System - HDM-4. Site www.hdmglobal.com
- 6 **PAV-ECO**, Economic evaluation of pavement maintenance & life cycle cost at project and network level, Union Européenne, **1997**. Site : <http://www.cordis.lu/transport/src/pav-eco.htm>
- 7 **BOITEUX M. et al.**, *Transport : pour un meilleur choix des investissements*, Commissariat Général du Plan, Paris, avril **2000**, 408 pages. Site <http://lesrapports.ladocumentationfrancaise.fr/BRP/014000434/0000.pdf>
- 8 **FORMAT** (Fully Optimised Road MAInTenance), Basic Model for Financial Evaluation of Pavement Deterioration and Additional Costs at Road Works, Deliverable report D3/4, Union Européenne, janvier **2003**.
- 9 **OCDE**, *Gestion du patrimoine d'infrastructures dans le domaine routier*, **2001**, 90 pages.
- 10 **PARIS** (Performance Analysis of Road InfraStructure), Final report, Bruxelles, **1999**. Site <http://paris.zag.si>
- 11 **BRILLET F., LEPERT P.**, Une recherche menée dans le cadre européen : le contrat PARIS (Performance Analysis of Road InfraStructure), *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **223**, septembre-décembre **1999**, pp. 13-25.
- 12 **LEPERT P., SAVARD Y., LEROUX D., RÊCHE M.**, Méthodes statistiques de prévision de l'évolution d'une chaussée, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **250-251**, avril **2004**.
- 13 **MICHAUT J.-P., BRILLET F.**, Application FORMAT, Chantier du périphérique est de Toulouse en enrobés drainants. *Revue générale des routes et aérodromes*, **831**, septembre **2004**.
- 14 **FORMAT** (Fully Optimised Road MAInTenance), WP5, Analysis of general and specific accident data, Deliverable Report D11, janvier **2004**.

- 15 Site www.aggregain.org.uk
- 16 VTT, *Unit Emissions in Finland, freight vehicles*, 2002. <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/earthmovinghighway.htm> et <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/earthmovingurban.htm>
- 17 Vehicle Certification Agency (VCA), *Department of Transport*, 2004. <http://www.vcacarfueldata.org.uk>
- 18 CHANDLER J., PHILLIPS S., ROE P., VINER H., *Quieter Concrete Roads : construction, texture, skid resistance and noise*, *TRL Report 576*, 2003.
- 19 Welsh Office, *Calculation of Road Traffic Noise*, Department of Transport, HMSO, 1998.
- 20 SIAUDEAU S., *Étude de la typologie des courbes de trafic sur un réseau routier et application à la caractérisation statistique des bouchons*, Rapport de stage de Maîtrise, Institut de mathématiques appliquées, Angers, juin 2002, 87 pages.
- 21 STATGRAPHICS Plus est édité par Manugistics, Inc. et Statistical Graphics Corporation, commercialisé en France par SIGMA PLUS. Site : http://www.francestat.com/statgy5/statgraphics_5.htm
- 22 SETRA-CSTR, SIREDO, *système informatisé de recueil de données de circulation*, Note d'information, septembre 1994.
- 23 PESTEIL F., *Logiciel ECCU, une aide pour les gestionnaires de voirie*, *FACES40*, décembre 2001.
- 24 SIAUDEAU S., *Modèle de prévision du temps passé par les usagers de la route dans les bouchons* Rapport de stage de DESS, Institut de mathématiques appliquées, Angers, juin 2003, 78 pages.
- 25 FORMAT (Fully Optimised Road MAInTenance), *Integrated prototype spreadsheet*, Deliverable report D10, Union Européenne, janvier 2004.
- 26 FORMAT (Fully Optimised Road MAInTenance), *Calibration and validation of the integrated CBA model*, Deliverable report D15, Union Européenne, janvier 2005.
- 27 FLOCH E., ABADIE R., *Projet FORMAT - Test de l'assistant chantier ECCU - Rapport d'expérimentation Chantier de la RN 137 sud en Ile-et-Vilaine*, CETE de l'Ouest, Division sécurité et techniques routières, décembre 2003.
- 28 *Highway Capacity Manual (HCM)*, Transportation Research Board (TRB) publications, Washington DC, 2000.
- 29 *Choix d'un mode d'exploitation*, Guide Technique, vol. 6, SETRA, 2002.
- 30 GUIBERT A., *Typologie des routes selon la répartition des débits de trafic*, Rapport de stage de DESS, Institut de mathématiques appliquées, Angers, juin 2004, 90 pages.