

« EVOLUTION DE LA CONCEPTION DES STRUCTURES » DES CHAUSSEES DE 1974 à 1984

par A. Jakani
Chef du département Infrastructures LPEE

Résumé :

Au début des années 70, les méthodes de calcul des Structures de chaussée se basaient sur des notions simples d'agressivité du trafic et de la portance des sols, et par un système de coefficients d'équivalence, les épaisseurs des couches de renforcement et leurs natures pouvaient varier de façon continue, les matériaux utilisés étant des graves non traitées surmontées de revêtement ou d'enrobé et reposant sur des structures traditionnelles en Blocage/Pierre cassée.

Les problèmes posés par le comportement de certaines chaussées dans un environnement spécifique au Maroc ont fait que la réflexion abouti en 1977 à un Catalogue de Structures Types qui régit le cas des chaussées neuves et qui a été élaboré dans le but d'une utilisation simple précise et unifiée à travers toutes les régions du royaume.

La question des renforcements a dû être repensée à l'occasion du 3ème et 4ème Projet des renforcements coordonnés (P.G.R.) et à partir de 1979 et compte tenu des disponibilités de nouvelles données routières précises (bascule-défectographe), le point a été fait sur les méthodes étrangères disponibles et notamment leurs limites d'application au cas national et les résultats directs de ces méthodes ne sont pris que pour évaluer l'importance du renforcement, quant à la nature du renforcement à adopter, elle devait répondre à des impératifs de géotechnique routière extraite d'une expérience nationale de plusieurs années.

Les tendances actuelles poussent la réflexion des ingénieurs routiers d'une part vers l'utilisation de nouvelles techniques améliorant le rapport qualité/prix, mais faisant appel à des matériaux non encore expérimentés localement et d'autre part vers une meilleure connaissance de matériaux utilisés (Modèle mathématique de comportement — loi de fatigue).

Préambule

Vers les années soixante dix et un peu avant, les méthodes de calcul des structures de chaussée se basaient essentiellement sur la qualité du sol d'une part et l'agressivité du trafic d'autre part, agressivité non pas objective c'est à dire extraite d'une analyse spectrale du trafic mais plutôt agressivité définie de façon très simple avec la notion de la roue la plus chargée et le nombre de son passage, c'est ainsi que la méthode Pelletier a servi pendant très longtemps aux calculs des chaussées neuves et des chaussées à renforcer.

Les anciennes structures quant à elles sont dans la très grande majorité des cas, des structures classiques de l'époque coloniale témoignant de la technique routière ancienne et qui a d'ailleurs fait ses preuves, ces structures sont en général : une couche de Blocage de 15 à 25 cm d'épaisseur suivie d'une couche de pierre cassée de 10 à 15 cm et parfois moins, puis un ou plusieurs revêtements superficiels. Les épaisseurs de ces couches sont le plus souvent liées à la dimension du matériau, et il est rare d'avoir une pierre cassée de 40/80 mm sur plus de 16 cm. La dureté des matériaux et notamment celle des blocages est variable d'un site à l'autre mais non liée à la nature du sol.

1. Première période de l'actuelle décennie (1974 – 1977)

Une première vague des renforcements des élargissements est venue donc renforcer ces structures classiques, et les méthodes de conception étaient du Type Pelletier ou similaire, c'est à dire basées sur la portance du sol et la charge du Trafic, puis, par une différence entre épaisseur nécessaire et épaisseur résiduelle équivalente, on déduisait l'épaisseur de renforcement, ce qui évidemment introduisait la notion de coefficient d'équivalence avec tous les inconvénients de subjectivité que l'on connaît. Les structures de renforcement étaient modulées de façon continue moyennant un coefficient, et on passait ainsi des Tout-Venants roulés, ceux concassés ou semi-concassés et jusqu'aux enrobés denses à chaud par des calculs arithmétiques de transformation des épaisseurs.

Pendant une bonne période du début de la décennie 74/84 la méthode de conception des renforcements routiers était la note 29 du Laboratoire Anglais T.R.R.L., mais la Road Note 29 utilisait comme paramètres d'entrée deux données distinctes : la portance du sol de plateforme (C.B.R.) d'une part et le trafic équivalent d'autre part. La difficulté était de convertir le trafic national en trafic équivalent à 8,2 T qui est l'essieu standard anglais. La loi de Liddle était bien connue à l'époque $x_i(\pi/8,2)^{3,8}$ mais il fallait disposer du

spectre des essieux (les PI et les xi correspondants). Il était donc nécessaire de prendre des hypothèses plus ou moins rapprochées de la réalité, l'hypothèse la plus courante était de supposer que 35% du trafic sont des PL et que 20% des PL ont un essieu de 13 T.

Quant à la portance du sol, elle ne posait pas trop de difficulté dans la mesure où l'essai C.B.R. est très bien réalisable dans de bonnes conditions, par contre la mesure du C.B.R. après 4 jours ne correspond pas toujours à des conditions de sol les plus mauvaises, en effet, pour les sols sablo-graveleux la saturation est atteinte bien avant les 4 jours d'immersion alors que pour les sols fins tels que les marno-argileux il faut plus de 96 heures pour les saturer. Mais malgré cet handicap, la méthode anglaise ne donnait pas trop de divergences au niveau du résultat final car la donnée C.B.R. n'influe que sur l'épaisseur de la couche de fondation, les couches de base et de roulement sont dimensionnées en fonction du trafic cumulé équivalent indépendamment de la portance du sol, de plus pour des C.B.R. supérieurs à 7, il n'y a plus de variation de la couche de fondation avec le C.B.R. La simplicité de la méthode anglaise a fait donc qu'elle a été longuement utilisée au début de l'actuelle décennie aussi bien pour la conception des chaussées neuves que pour les renforcements.

Cependant la note 29 avait un inconvénient majeur malgré sa simplicité, elle avait l'inconvénient d'être étrangère c'est à dire que les caractéristiques des matériaux qu'elle propose sont méconnues au Maroc, en effet la Road Note 29 pour la couche de roulement propose un « rolled Asphalt » qui n'est pas forcément l'enrobé marocain, le rolled Asphalt ayant des performances plus proches des anciens Bender que des GBB et EB Nationaux. De même le macadam à l'eau proposé pour les couches de base au sens RN 29 n'est pas bien connu à l'échelon national, d'où les difficultés de transposition par des coefficients d'équivalence avec toutes les approximations que cela représente et dont il a été question précédemment.

Parallèlement à la méthode précédente, les concepteurs des structures de chaussée disposaient d'autres méthodes mais moins courantes que la RN 29 c'est le cas en particulier du rapport LR 571 du T.R.R.L. anglais ou le Catalogue Français du Setra mais ce dernier n'était pas encore au point au début de la décennie. Pour l'utilisation du rapport 571 il fallait disposer des déflexions, or pendant la période qui nous concerne le Maroc ne disposait pas encore de Déflectographe, et les mesures se faisaient seulement à la poutre Benkelman tous les 50 m, donc elles avaient toutes les chances de masquer les points faibles de la chaussée puisque la mesure ne se faisait pas de façon continue, cependant ces mesures avaient l'avantage de permettre le repérage des tronçons homogènes ce qui permettait d'implan-

ter les sondages sous chaussée de façon rationnelle. Par ailleurs cette méthode avait des problèmes de transposition comme toutes les méthodes étrangères à savoir :

— Connaissance de la déflexion admissible pour le cas spécifique des chaussées nationales d'une part et mesures des déflexions sous l'essieu de 8,2 T anglais d'autre part, ce qui introduisait bien sûr des corrélations peu précises mais la méthode LR 571 du T.R.R.L. avait tout de même l'avantage de donner directement l'épaisseur de renforcement sans passer par la notion d'épaisseur nécessaire et d'épaisseur résiduelle équivalente, le résultat est exprimé directement en épaisseur réelle d'enrobé du type anglais et il fallait toujours le transformer par des coefficients plus ou moins sûrs pour le ramener en épaisseur équivalente de matériau non traité dans le cas où l'on désirait utiliser ce genre de matériau.

La phase suivante de la conception des structures de chaussée était de redistribuer l'épaisseur équivalente de renforcement ou de chaussée neuve en une plusieurs couches de matériaux connus à l'échelon national et dont la technique de mise en œuvre était déjà assez bien maîtrisée, parmi les matériaux non traités on disposait des Tout-Venant, roulé, semi concassés ou concassés entièrement et parmi les matériaux traités : le Bender des années antérieures à 1960/1970 était remplacé par la grave traitée au bitume en tant qu'enrobé dense à chaud quant aux couches de roulement on disposait soit des classiques revêtements superficiels soit des enrobés denses à chaud de plus petite granulométrie que la grave bitume, c'est à dire les bétons bitumineux que l'on réservait aux forts trafics.

Il est remarquable de constater qu'à cette époque, le concepteur se préoccupait essentiellement d'une sorte de « calcul arithmétique » c'est à dire que la traduction d'une épaisseur équivalente de renforcement en diverses épaisseurs de matériaux standards avait plus d'importance que le comportement mécanique de la chaussée dans son environnement géotechnique et sous les sollicitations du trafic et du milieu climatique ambiant mais il faut reconnaître que les matériaux cités précédemment ne disposaient pas de suffisamment de recul pour que le concepteur s'entoure de précautions à priori non justifiées, le concepteur de cette période ne pouvait disposer que d'une certaine expérience du comportement des chaussées à structure traditionnelle (blocage pierre cassée et enduit) et comme chacun sait, ces structures ont eu pratiquement un comportement similaire du point de vue aspect quel que soit l'environnement géotechnique, par contre du point de vue uni-viabilité niveau de service et d'une

façon générale du point de vue confort, le comportement n'a pas été le même selon les régions géotechniques.

Les structures type que l'on rencontrait donc étaient très grosso-modo les suivantes :

- 1) Pour de fortes épaisseurs équivalentes : Grave Bitume + Tapis de BB
- 2) Pour les moyennes épaisseurs équivalentes : Tout Venant concassé ou semi-concassé + tapis de BB
- 3) Pour les petites épaisseurs équivalentes : Tout Venant concassé ou semi-concassé + revêtement bicouche.

Pour les chaussées neuves, le même processus était appliqué avec bien sûr une couche de fondation en Tout Venant brut ou semi-concassé le reste des couches (Bases et roulement) dépendait de la valeur de l'épaisseur totale nécessaire équivalente.

2) Seconde période de la Décennie (1977/1984)

Durant la seconde moitié de la décennie, l'expérience avait montré qu'à portance égale du sol et à trafic égal, les structures n'avaient pas le même comportement selon l'environnement géotechnique et selon le climat régional, et qu'il était donc impératif de nuancer les structures non seulement en fonction des sols et trafics mais en plus en fonction de l'aridité des zones et même en fonction de certains sols particuliers au Maroc tels que les tirs.

2.1 – Cas des chaussées neuves : Catalogue des Structures Types :

Tenant compte des remarques précédentes, il a fallu se préoccuper d'abord des chaussées neuves, car ces dernières n'ayant pas comme support une ancienne chaussée du type traditionnel pouvaient avoir à travers sa durée de vie un comportement effectivement représentatif de la méthode adoptée. Il fallait donc se fixer une méthode simple et précise. D'autre part on savait que les petites variations de trafic dans une certaine plage n'avaient pas d'influence majeure sur les structures à retenir. Pour les sols il est admis que l'identification du sol en granulométrie, limites d'atterberg et compacité in-situ peut être directement liée à sa portance il était donc tout à fait concevable de raisonner classe ou catégorie dans un souci de simplicité et de facilité d'emploi de la méthode, c'est ainsi que la méthode de conception des structures pour chaussées neuves a donné naissance au Catalogue des Structures Types en 1977.

Le catalogue distingue 5 classes de sols (S 0 à S 4) couramment rencontrés sur le réseau routier national, de plus il prévoit une chaussée type à expérimenter sur les sols à variation volumétrique connus

sous le nom de « Tirs » ainsi que d'autres structures à expérimenter introduisant la grave émulsion et le béton de ciment.

Il distingue également 4 classes de trafic (T 1 à T 4) qui correspondaient en 1977 à la plupart des trafics mesurés sur notre réseau à partir de 4500 V/J (la plus forte classe T 1) on passe en T0 et dans ce cas le Catalogue renvoie à une étude spéciale, c'est dire hors Catalogue puisque dans l'esprit du Catalogue les trafics supérieurs à 4500 V/J sont exceptionnels, mais il est probable que des ajustements sur les classes de trafics s'avèreront nécessaires dans l'avenir à cause de l'évolution du parc national des véhicules.

Les problèmes de drainage des chaussées et chute de portance des sols en présence d'eau ne sont pas perçus avec la même importance selon la région climatique et c'est ainsi que le Catalogue distingue 2 zones une aride à pluviométrie inférieure à 300 mm/an et une zone non aride à pluviométrie au dessus de la barrière 300 mm/an. Malheureusement un grand nombre de régions nationales à pluviométrie autour de 300 mm/an ont du mal à être classées dans une zone donnée car parfois la non aridité théorique et l'aspect désertique et caillouteux de l'environnement sont contradictoires et dans ce cas le concepteur attribue à la zone une classe qu'il juge être la bonne. Mais dans l'avenir, les résultats des études de recherche sur la climatologie qui sont en cours et qui tiennent compte de l'ensoleillement de l'évaporation etc... permettront sans doute de revoir et réajuster le zoning climatique du Catalogue.

Les structures proposées par le Catalogue sont de 2 types : une catégorie souple en matériaux non liés (GNF — GNA — GNB — RS) et une catégorie semi-souple en matériaux liés (liants hydrocarbonnés seulement : GBB et EB) on a donc au total 4 fiches : 2 par zone et pour chaque zone 2 types.

Il en résulte donc que les chaussées construites après 1977 obéissent aux structures standards proposées par le Catalogue et il n'y a plus les ambiguïtés des coefficients d'équivalence, mais d'un autre côté le fait que le Catalogue soit une méthode discontinue c'est à dire que pour une combinaison de classes sol/trafic (Si — Ti) elle donne une structure type fait que quand on passe d'une classe de trafic à une classe voisine l'épaisseur des couches peut changer de 5 cm de façon discontinue, il s'en suit que l'on peut être légèrement surdimensionné dans un cas et légèrement sous dimensionné dans l'autre tels que le montre l'exemple suivant :

- . Chaussée type 2 Zone NA : T3/S4 : RS+20 cm GNB pour 250 V/J par exemple
- . Chaussée type 2 Zone NA : T4/S4 : RS+15 cm GNB pour 190 V/J par exemple

Signalons enfin que dans un souci d'analyse du comportement ultérieur des chaussées type Catalogue et afin de comparer le comparable, le catalogue a donné des définitions standards des matériaux mentionnés dans les structures types de telle sorte qu'une GNA ou un GBB par exemple soient effectivement les mêmes aussi bien dans le Nord du Pays que dans le Sud, il va de soi que les spécifications et performances en question ne sont pas obtenues avec la même aisance d'une région à l'autre.

En résumé : les structures de chaussée ont été standardisées vers les années 1977 et suivantes par la mise au point d'un Catalogue Type pour chaussées neuves. Ce catalogue a été la réponse à une volonté d'adapter la conception des chaussées aux conditions géotechniques des sols marocains et aux trafics usuels nationaux d'une part et dans un souci de simplifier la conception des structures et de les unifier à travers les régions du Royaume d'autre part.

2.2 – Cas des renforcements : exemple des P.G.R. coordonnés :

En 1977, le L.P.E.E. avait acquis pour le compte de la DRCR un déflectographe Lacroix et à partir de cette année et jusqu'en 1979 le L.P.E.E. avait lancé trois campagnes annuelles de mesures de déflexions et d'auscultation avant que le matériel soit transféré au CNER, ce dernier ayant en charge la poursuite des campagnes d'auscultation et de mesures des déflexions (il dispose actuellement d'un 2ème déflectographe). Les ingénieurs routiers nationaux pouvaient donc disposer de données suffisantes pour envisager les études de renforcement faisant appels aux déflexions.

Parallèlement aux auscultations, le L.P.E.E. avait acquis en 1977 pour le compte de la DR – CR une bascule dynamique et en 1977 - 78 et 79 trois sites différents R.P.1 – R.P. 2 – R.P. 13 ont reçu la bascule ce qui avait permis une analyse spectrale des essieux des poids lourds du parc national.

Vers la fin de l'année 1979 et surtout à partir de 1980, la DR CR avait lancé un vaste programme de renforcements coordonnés et dont l'étude avait été confiée au L.P.E.E. et à l'occasion de ce programme (3ème Projet et 4ème Projet routier) le L.P.E.E. et la DR CR en étroite coopération avaient fait le point sur les méthodes de calculs disponibles pour évaluer les renforcements et on s'est vite rendu compte que toutes les méthodes quel'on pouvait appliquer ont le point faible d'être étrangères et qu'il fallait introduire des ajustements sur les paramètres d'entrée pour pouvoir minimiser les risques d'erreurs dues à une transposition brutale, ces ajustements ont été bien sûr largement facilités par les disponibilités des données routiè-

res dont il a été question précédemment (analyse spectrale du trafic et mesures systématiques des déflexions) mais malgré ces précautions les méthodes ne donnaient pas entière satisfaction d'une part parce que l'application directe masque les problèmes géotechniques et de mécanique des chaussées spécifiques au cas marocain et d'autre part parce qu'elles supposent l'utilisation de matériaux dont la loi de comportement et notamment en fatigue n'est pas bien connue au Maroc, pour plus de détail le lecteur peut voir la communication du L.P.E.E. au congrès routier de Liberville de Février 1983 qui avait traité la transposition des méthodes étrangères au cas national, et leurs limites d'application.

Nous citons ci-dessous les méthodes retenues pour les 3ème et 4ème PGR et qui sont également appliquées aux renforcements routiers autres que P.G.R. depuis 1980 moyennant les précautions mentionnées précédemment :

La plupart des méthodes utilisées dans le monde occidental avaient comme origine une « racine » commune qui est la méthode américaine A.A.S.H.T.O, on s'est donc proposé de revenir à cette méthode puisque les résultats de bascule dynamique permettaient de bien approcher la notion de trafic, par contre et en ce qui concerne d'autres paramètres de cette méthode tels que le niveau de service Pt et le coefficient régional R, les valeurs prises ont été rapprochées le plus possible du cas marocain sans mesures approfondies.

Outre la méthode américaine de base, d'autres méthodes ont été adoptées, l'ancienne RN 29 et la méthode Française du S.E.T.R.A. ainsi que le Catalogue des Structures en tant qu'instrument permettant l'évaluation de la chaussée nécessaire théorique dans le cas des calculs des renforcements par différence entre chaussée nécessaire et chaussée résiduelle.

Il faut souligner que toutes ces méthodes ne sont appliquées que dans le but d'évaluer l'ampleur du renforcement : lourd, moyen, léger ou simple entretien. Les résultats directs de ces méthodes ne sont pas appliqués « à la lettre » car elles ignorent le contexte national, le renforcement préconisé tient compte d'un certain nombre d'impératifs locaux, citons par exemple :

- * interdiction d'utiliser des matériaux liés (GBB ou EB) sur des chaussées fortement déformables à déflexions élevées ainsi que sur les chaussées à sol instable à moins que le trafic soit supérieur à 3000 V/J auquel cas la couche de roulement doit obligatoirement être en EB
- * traitement des annexes de la chaussée telles que drainage par accotements continus ou drains discontinus en arêtes de poisson

*** épaulement par coulisse GNB**

La note du L.P.E.E. d'Avril 1982, donne tous les détails des méthodes appliquées au cours de la seconde période de l'actuelle décennie avec les modulations nécessaires des données d'entrée et les types de renforcement à mettre en œuvre selon les divers cas de figure du contexte géotechnique et du type de l'ancienne chaussée à renforcer.

3) Les tendances actuelles :

La réflexion dans le domaine routier se poursuit actuellement dans deux directions :

1er axe : une meilleure connaissance des matériaux : en effet les matériaux routiers spécifiés par le Catalogue et confirmés par le CPC ont suffisamment de recul pour être examinés sous le double aspect : comportement in-situ et comportement en laboratoire et les calculs théoriques du comportement que l'on peut traiter sur modèle mathématique et par calcul automatique ne peuvent être faits avec représentativité et précision que si les lois de fatigue des matériaux sont connues précisément.

2ème axe : une meilleure exploitation des matériaux : devant la hausse continue des produits hydrocarbonnés à partir de 1973 et des coûts énergétiques de façon générale, la technique routière nationale s'est ouverte vers d'autres horizons dans le but d'introduire des matériaux routiers nouveaux moins consommateurs d'énergie et surtout nécessitant moins de dépenses en devise étrangère et c'est ainsi que la réflexion et bientôt l'expérimentation des techniques nouvelles telles que les Graves — Ciment, les Graves Emulsions, les enrobés souples en couche mince, le béton sec compacté ou la chaussée béton est bien engagée, réflexion qui aboutira à des expérimentations in-situ et au laboratoire et dont les résultats permettront de réaliser des chaussées répondant à la diversification des techniques dans un souci du meilleur rapport qualité/prix, tout en satisfaisant les préoccupations du géotechnicien routier et tout en tirant le meilleur parti pour l'économie du pays.