

DRAINAGE INTERNE DES
CHAUSSÉES

A. DERRADJI
M. MOTIA

RESUME

L'eau est un des facteurs prépondérants qui interviennent dans la dégradation des chaussées. Elle agit notamment sous ses deux formes : liquide et solide. En dehors du gel, l'objectif recherché par la mise en place d'un drainage interne est en général :

- de limiter les transferts d'eau interne dans la chaussée liés aux apports directs et surtout à l'effet de bord positif et d'en assurer l'évacuation rapide.

La solution n'est pas toujours simple et le système de drainage choisi ne remplit pas souvent ses fonctions si une étude complète faisant intervenir tous les paramètres en jeu n'a pas été réalisée.

Compte tenu de ces préoccupations, il est nécessaire d'envisager la route dans son ensemble et de se poser certaines questions :

- d'où vient l'eau ? par des apports directs ou des effets liés aux sols environnants ?
- comment circule-t-elle dans l'ensemble sol - chaussée ?
- quel système de drainage peut-on adopter ?

L'article se propose dans une première partie de présenter les modèles pouvant décrire le phénomène et dans une deuxième partie d'exposer le cas pratique de l'autoroute Rabat-Fès en cours de construction.

A - APPROCHE THEORIQUE DU DRAINAGE INTERNE DE LA CHAUSSEE

I. ENVIRONNEMENTS HYDRIQUES D'UNE ROUTE

Les différentes études réalisées ces dernières années par le réseau des LPC en France ont mis en évidence le rôle des infiltrations dues aux pluies dans les variations de l'état hydrique du corps d'une chaussée ou des matériaux sous jacents. Ces infiltrations proviennent principalement de deux sources, les apports directs et les effets liés au sol environnant.

a- Les apports directs

L'évaluation des apports directs dépend d'une part du régime de précipitation et d'autre part de certaines caractéristiques des revêtements qui sont distincts selon qu'il s'agisse d'infiltration uniforme dans toute la surface d'un revêtement ou d'infiltrations localisées dans les fissures et des joints ouverts, ces deux types d'infiltration peuvent coexister mais il convient de les traiter séparément.

1- Cas d'infiltration uniforme

Ce mouvement dépend essentiellement des conditions climatiques et des caractéristiques des couches de surface. Pour élucider l'importance de ces infiltrations, nous allons exposer certains résultats empiriques.

. Analyse du CRR-Belgique (réf.1)

VANGANSE suppose qu'il existe en dessous du revêtement, des matériaux capables d'emmagasinier ou de laisser passer toute l'eau infiltrée. Si cette condition n'est pas réalisée, le taux d'infiltration du revêtement se réduira dès que les pores ou les fentes du revêtement seront remplis. On notera une augmentation du ruissellement.

Le calcul de la hauteur d'infiltration uniforme se fait à partir des paramètres suivants :

- Vitesse d'infiltration, cette quantité est donnée par la loi Darcy généralisée : $V = K \text{ div } y$ où K représente la conductivité hydraulique et y se compose d'un potentiel gravitationnel et du potentiel matriciel dû aux forces capillaires. Le coefficient K augmente avec le degré de saturation et tend vers une valeur maximale K_{sat} , d'où la vitesse tend vers une valeur finale qui est $V = K_{sat}$.

- Les hauteurs et durées des précipitations en fonction de leur intensité.

- Le temps de séchage des revêtements après pluie.

L'infiltration totale sur une durée T est la somme des trois quantités suivantes :

- Infiltration due aux précipitations dont l'intensité $j > K$

- Infiltration due aux précipitations dont l'intensité $j < K$ de la chaussée

- Infiltration pendant le temps de séchage (pour $j > K$ seulement)

Une étude comparable faite à Bruxelles a montré qu'au delà de 10-5 cm/s de perméabilité, plus de 50% des précipitations peuvent s'infiltrer à travers la chaussée (

. Hollande (Dietz réf.4)

Les mesures effectuées sur un site expérimental de chaussée ont conduit à estimer l'infiltration directe à 60% des pluies, pour une chaussée de perméabilité $K = 1,15 \cdot 10^{-7}$ m/s.

. Résultat du LCPC (réf.2)

Un suivi pendant 3 ans des mouvements d'eau mené par le LCPC, a confirmé l'importance des apports directs dans le comportement des chaussées :

Pluies 10-7 m/s	2,3	2,52	2,33	3,61	3,33	1,77	3,75
Infiltration 10-7 m/s	1,7	1,6	1,7	1,2	1,3	0,65	1,5

Pour une perméabilité de 10-7 - 10-8 m/s.

2- Cas de l'infiltration non uniforme

Il s'agit des infiltrations dans les fentes et fissures, traversant des revêtements dont le matériau est peu perméable, elles sont régies par les mêmes paramètres pluviographiques que les infiltrations uniformes, mais les caractéristiques propres qui interviennent sont beaucoup plus complexes, à savoir : ouverture, profondeur, rugosité, disposition sur la chaussée etc...

La plupart des études réalisées sur ce sujet simplifient le problème par sa limitation du joint de bord et l'assimilation d'une fissure à une fente délimitée par deux plans verticaux parallèles dont la distance est immuable. Il devient alors possible d'encadrer la réponse par des approximations.

. Principe de la démarche du C.R.R. (3)

Le CRR a établi des abaques (fig 3) présentant le débit théorique d'un joint en fonction de :

v : vitesse moyenne du film d'eau en bord de fente

h : hauteur du film d'eau au bord

b : ouverture de la fente

B: pente en travers

Les calculs montrent qu'un joint de bord (pour une chaussée de 10m de large) :

- de 0,04 cm suffit à absorber les précipitations dont l'intensité ne dépasse pas 10-4cm/s

- de 0,24 cm permet d'absorber les plus fortes précipitations (10-3cm/s)

Ceci nous donne une idée sur le rôle que peut jouer un joint de bord dans l'absorption du ruissellement et surtout s'il y a continuité dans un drain ou un milieu perméable.

. Critère de Ridgeway (USA, réf.4,5)

Ridgeway propose un critère de prévision de débits d'infiltration le long des joints transversaux, tenant compte de la fréquence des joints aux fissures sur la chaussée:

$$Q = 100 [(N+1)/0.3 + W/S]$$

avec N = nombre de voies

W = largeur de chaussée

S = distance moyenne entre les fissures transversales

Q = infiltration en cm³/h/ml de chaussée

a- EFFETS LIES AU SOL ENVIRONNANT

I- Effets de bord

On désigne par effet de bord le mouvement d'eau horizontal en bordure de la chaussée, induit par la différence de comportement de la surface de la chaussée par rapport à celle de l'accotement.

Cet effet peut résulter de la migration latérale vers le sol de fondation de l'eau des précipitations qui s'est infiltrée à travers les accotements. Il produit dans ce cas, une humidification du sol de fondation dans la zone de bord et nous l'appellerons " effet de bord positif ".

L'effet de bord peut aussi résulter d'un départ d'eau du sol de fondation vers les accotements par drainage, évapotranspiration ou autre, nous le désignerons par " effet de bord négatif ".

Avant d'entamer la modélisation numérique de cet effet, nous avons cru préférable de citer certaines études où il est question essentiellement de l'effet de bord positif.

. résultats du CRR (réf.1)

Des recherches menées en Belgique par le CRR ont montré que dans la plus grande partie du pays où le gel n'est pas important, l'effet de bord apparaît comme la cause principale d'humidification excessive des sols de fondations.

. constatations

De nombreuses études basées sur la comparaison du comportement des chaussées avant et après l'imperméabilisation des accotements (réf.7) ou la pose d'une barrière verticale étanche aux bords de la chaussée (réf.11) ont montré l'effet bénéfique de ces moyens contre l'effet de bord positif.

Cette constatation a également été faite en Grande Bretagne (réf.6) et surtout dans les zones de climat tempéré et humide.

2- Variation de niveau de la nappe

Une nappe est l'ensemble des eaux de la zone saturée d'un aquifère, susceptible de variations suivant le cycle climatique et le milieu où elle se trouve.

. sols grenus

Ces milieux ont en général des courbes de succion présentant un palier marqué. Les remontées capillaires sont donc faibles et limitées à quelques centimètres au dessus du niveau saturé.

. sols fins

Ils présentent des courbes de succion très différentes sans paliers, marqués d'où une modification sensible de teneur en eau qui peut se répercuter même à plusieurs mètres au-dessus de la zone saturée.

- cas d'une nappe à faible profondeur

L'état hydrique du sol est influencé par la nappe et ses variations saisonnières, en même temps que par les infiltrations ou l'évapotranspiration. On se situe toujours dans le cas de suctions faibles et donc une perméabilité non saturée $K(q)$ assez proche de K_{sat} (perméabilité à saturation), le sol est donc très proche de la saturation.

- cas d'une nappe à grande profondeur

Ce cas là influence peu l'état hydrique du sol. En fait, dans la plupart des régions, à proximité de la surface du sol, l'équilibre n'est jamais atteint du fait des épisodes climatiques contrastés. On doit donc considérer les premiers mètres comme presque toujours en régime transitoire, au-dessous on peut considérer que la teneur en eau est influencée par la profondeur de la nappe essentiellement.

II. PROCESSUS DE MIGRATION DE L'EAU DANS LES CHAUSSEES

a- Répartition de l'eau dans le sol

La répartition verticale de l'eau dans une coupe de sol est schématisée dans la figure suivante. On distingue une zone saturée et une zone d'aération. Dans cette dernière, il existe une phase gazeuse et l'eau libre est soumise à des forces capillaires : la pression est donc négative ($p = 0$ correspond à la pression atmosphérique). Au dessus de la nappe s'élève une frange capillaire, l'eau remonte par capillarité à travers les pores du sol. Depuis les travaux de Richard (1931), on sait que le passage du domaine non saturé au domaine saturé se fait d'une façon continue avec une augmentation régulière de la teneur en eau.

b- Mise en équation

- Zone non saturée

Le transport d'eau pure en milieu homogène et isotrope, partiellement saturé, est régi par l'équation suivante :

$\partial q / \partial t = \text{div} [k(q) \cdot \text{grad}(h)]$, qui s'écrit aussi : $c(h) \partial h / \partial t = \text{div} [k(h) \text{grad}(h)]$ (Richard)

avec :

q = teneur en eau

t = temps

$h = h(q)$, charge hydraulique

$k(q)$ = conductivité hydraulique

$c(h)$ = capacité capillaire

- Zone saturée

Un milieu constamment saturé est régi par l'équation suivante :

$$\text{div} [k \text{ grad}(h)] = 0$$

c- Modélisation du drainage interne de la chaussée

Le modèle numérique utilisé pour résoudre ces équations est connu sous le nom NSAT, il fait partie des modules fonctionnels du programme général par éléments finis CESAR du LCPC, qui traite à la fois des problèmes de mécanique, les problèmes de diffusion, ou des problèmes couplés. Le programme NSAT est basé sur l'équation générale de Richard avec des courbes $q(h)$ et $k(h)$ utilisées du type Vachaud :

$$k(h) = k_{\text{sat}} \left[\frac{a}{a + |hb|} \right] \text{ si } h < 0, \quad k(h) = k_{\text{sat}} \text{ pour } h \geq 0$$

$$q(h) = q_{\text{sat}} \left[\frac{c}{c + |hb|} \right] \text{ si } h < 0, \quad q(h) = q_{\text{sat}} \text{ pour } h \geq 0$$

Le modèle numérique proposé dans cette étude (NSAT) a été appliqué pour simuler les processus de migration de l'eau dans les chaussées (en régime transitoire) et plus particulièrement le fonctionnement d'un drain latéral. Pour ce faire on propose le plan suivant :

- **phase 1** : modélisation des infiltrations dans une chaussée sans système de drainage. Cette phase devrait servir de modèle témoin pour les autres cas de simulations.

- **phase 2** : dans cette phase, la chaussée est équipée d'un écran de rive imperméable. Cette simulation devrait mettre en évidence le rôle de l'écran de rive dans la protection de la chaussée contre l'effet de bord positif.

- **phase 3** : cas où l'imperméabilisation de la partie supérieure de l'écran fait défaut.

- **phase 4** : modélisation d'une chaussée avec un écran drainant.

Données communes aux différentes simulations

On considère une tranche de sol de 5,5 m de large et 2 m de profondeur. Cette tranche représente une demi-section (en travers) d'une route.

. A la surface, on impose un flux constant $q = 0,310-6$ m/s pendant ($t = 50$ h) ce qui correspond à l'apport d'une lame d'eau de 54 mm.

- . A la surface de l'accotement on impose une saturation pendant toute la simulation.
 - . A la base de la demi-section on considère que l'écoulement est gravitaire.
 - . A une profondeur de -1m apparaît une nappe dans le massif.
- La chaussée est constituée d'une grave dont le comportement hydrodynamique est représenté par les expressions suivants:
- $k(h) = k_{sat} [a / (a + hb)]$, avec $a = 0.432 \cdot 10^{-2}$, $b = 2.68$ et $k_{sat} = 0.151 \cdot 10^{-4}$
- $q(h) = q_{sat} [c / (c + -hb)]$, avec $c = 0.475$, $d = 0.315$ et $q_{sat} = 0.244$
- La simulation proposée considère donc un régime d'écoulement très défavorable dans lequel on suppose que les deux types d'apports directs et apports liés à la réserve de l'accotement coexistent.

Analyse des résultats (par simulation)

Les résultats détaillés des différentes simulations sont présentés dans la référence 10, sous forme d'équipotentielles et de diagrammes de variation de la charge en fonction de la cote et du temps. Le lecteur trouvera ci dessous une présentation abrégé des résultats importants.

Cas d'une chaussée sans drain

Il y a une migration latérale vers le corps de la chaussée, de l'eau qui s'est infiltrée à travers l'accotement. On confirme que les parties les plus touchées par les apports latéraux sont les rives de la chaussée, nous remarquons bien que ce niveau se sature plus vite que les autres parties.

Cas d'une chaussée avec écran vertical non drainant

La modélisation d'un écran vertical consiste à introduire dans le même maillage que celui de la chaussée sans drain, un élément rectangulaire de dimension 0,2 x 0,5 m séparant la chaussée de l'accotement. Cet élément est considéré comme une région vide. L'imperméabilisation de la partie supérieure du drain est modélisé par un matériau pratiquement imperméable.

Les constations qui peuvent se déduire de cette simulation sont :

- En comparant les diagrammes de charge en fonction de la cote dans le cas d'un écran vertical avec ceux obtenus pour la chaussée témoin, on a remarqué que l'écart est nettement grand, ce qui prouve bien l'intérêt de l'écran et surtout en régime pluvial important (comme celui considéré).
- Il existe un niveau saturé en eau (nappe perchée) à la base de la couche du grave, après un certain temps d'infiltration ($t = 30h$). Cette remarque se joint à l'ensemble

des études expérimentales sur l'efficacité du drainage au niveau des contrastes de perméabilité (contact couche de forme-remblai).

- Enfin, nous avons noté qu'une remontée de la nappe rend le dispositif inefficace, d'où l'intérêt d'un écran drainant.

Cas d'un écran sans imperméabilisation de sa partie supérieure.

Nous voulons insister dans ce paragraphe sur le rôle que joue "un film étanche" ou "un compactage de la partie supérieure de l'écran", dans la protection de la chaussée contre les venues d'eaux latérales.

On a montré (rèf 10) que l'absence de cette étanchéité rend l'écran pratiquement inutile. en effet, l'alimentation en eau du corps de la chaussée est comparable à celle de la chaussée témoin.

d- Cas d'un écran drainant

L'écran de rive étanche n'est efficace que si aucun apport d'eau n'intervient à travers la chaussée ou par une remontée de la nappe. ce qui n'est pas le cas des chaussées sous climat humide.

L'écran drainant sera donc conçu pour remplir les fonctions suivantes :

- jouer le rôle d'écran de rive étanche, c'est -à-dire protéger la chaussée contre l'effet de bord

- drainer les eaux d'infiltrations d'origines diverses.

Dans cette simulation, nous avons essayé de refléter ces différentes fonctions.

- tous les graphes correspondants à une période de temps dans l'intervalle "0 -30 h" sont semblables à ceux obtenus dans le cas d'un écran étanche. Dans cet intervalle de temps, la chaussée se trouvait dans un état non saturé.(rèf 10).

- La figure 9 montre la formation d'une nappe perchée (à t -30 h, ce qui correspond à un apport de 33 (mm). Cette nappe est rabattue sur la surface de suifement.

La solution écran drainant paraît la meilleure, ce que confirme l'ensemble des recherches et études du drainage routier. Cependant, il est nécessaire d'être extrêmement critique sur la représentativité réelle de ces résultats, vu les simplifications qu'on s'est données au cours des simulations.

B) LES DISPOSITIFS DE DRAINAGE: Exposé du système de drainage de l'autoroute Rabat- Fès

Les dispositifs de drainage interne ont évolué dans un large éventail depuis les premiers pas vers ce système de protection de la route. Du plus simple au plus compliqué de ces dispositifs on peut citer:

- . La barrière horizontale étanche sur les accotements
 - . L'évacuation horizontale au travers de la BAU ou de l'accotement
 - . L'évacuation verticale au travers de la couche de fondation
 - . L'écran capillaire drainant à sa partie inférieure.

I. Expose général des dispositifs de drainage

a- La barrière horizontale étanche

Elle est obtenue par imperméabilisation des accotements. Ce dispositif supprime la cause première de l'effet de bord positif mais n'est pas efficace dans le cas d'une nappe à faible profondeur.

Par ailleurs, le maintien dans le temps de l'étanchéité de la barrière peut être mis en défaut par la détérioration pouvant survenir sous l'effet des charges roulantes sur les accotements.

b- L'évacuation horizontale au niveau de la BAU

Cette conception est fondée sur la constatation suivante: l'eau circule bien et relativement vite dans les fissures et au niveau de l'interface (couche bitumineuse ou en béton - fondation).

En section courante, l'eau arrive rapidement au bord de la chaussée où elle sera évacuée par le drain de rive.

D'autres dispositifs remplaçant le massif drainant ont été expérimentés dans plusieurs pays (Etats unis, Belgique, Grande Bretagne, Suisse) sur des chaussées en béton. Ces dispositifs ont été réalisés sur des sections où la BAU a été réalisée avec le même béton que le revêtement et parfois en un seul passage du coffrage glissant. L'expérience a montré que, dans les conditions françaises, la solution en drain de PVC avec remontée du film étanche est la plus acceptable mais reste difficile à réaliser dans le cas d'un grand chantier.

c- L'évacuation verticale au niveau de la couche de fondation

Cette solution est très efficace mais reste exigeante en ce qui concerne le choix des matériaux:

- La fondation doit avoir une forte porosité
- Il faut introduire une couche imperméable sous la fondation pour pouvoir véhiculer l'eau jusqu'à la tranchée drainante.

I.4. L'écran capillaire vertical

L'écran de rive a été conçu en Belgique et repose sur les principes suivants:

- Il constitue une barrière verticale contre la migration d'eau de l'accotement vers le sol de fondation.
- Il fonctionne comme une tranchée drainante dans le cas de remontée de la nappe.

L'inconvénient majeure de ce dispositif est la nécessité de disposer d'un sable propre dont le coût de production est élevé.

II. DISPOSITIF DE DRAINAGE INTERNES SUR L'AUTOROUTE RABAT-FES

Caractéristiques du système de drainage adopté:

Le drain est systématiquement disposé au niveau des pieds des talus des déblais, et dans le TPC le long de l'autoroute. Les regards sont disposés tous les 60 m.

Le tuyau drainant a un diamètre de 15 cm et ses caractéristiques mécaniques doivent lui permettre de résister sous une charge de 30 tonnes lorsqu'il est protégé par une couche de 85 cm.

Le matériau de remplissage a un fuseau inscrit dans les fourchettes (6mm - 20mm) ou (0 - 20), la quantité des fines est inférieure à 5%.

Le matériau doit aussi avoir :

. un pouvoir filtrant (anti contaminant): $D_{15} / d_{85} < 5$; D_{15} étant la maille du tamis laissant passer 15% du matériaux drainant et d_{85} et la maille du tamis laissant passer 85% du terrain à drainer ,Cette condition est satisfaite pour l'ensemble des sols rencontrés sur le tracé à l'exception des sols type A3 et A4, dans ce cas un géotextile ou du sable est mis au niveau de l'interface matériau drainant - sol..

. un pouvoir drainant : $D_{15} / d_{15} > 5$
un coefficient d'uniformité (pour éviter la ségrégation) : $C_u = D_{60} / D_{10} < 20$

. Adaptation du matériau au drain : $D_{18} / (\text{Largeur fente de drain}) > 1,2$

Exemple de matériaux drainant

Il s'agit d'une grave 0/20 continue recomposée à partir des matériaux pour béton provenant de la carrière El ouara, à savoir: gravette 5 /10 à raison de 10% , gravette 10/20 à raison de 10% et du sable 0/5 à raison de 80%;

Ces pourcentage ont été motivés par le souci de fournir à la fois un matériau non colmatable (courbe non creuse), à meilleur perméabilité (bosse à 5mm) et adapté à l'ouverture du drain PVC (1.2 mm).

CONCLUSION GENERALE

L'utilisation du modèle numérique a permis de mieux comprendre les processus de circulation de l'eau dans les chaussées et d'apprécier le rôle que peut jouer un écran de rive drainant dans la protection des sols de fondations contre l'effet de bord positif.

La simulation a montré aussi qu'une entrée accidentelle d'eau libre dans le sol de fondation conduit à la formation d'une nappe perchée, au niveau du contraste de perméabilité. Un drainage à ce niveau s'est montré efficace.

Bien que le problème de protection des sols de fondation contre l'effet de bord négatif n'ait pas été étudié, il semble raisonnable, en première analyse, de croire à l'efficacité des écrans latéraux comme moyen de protection de certains sols de fondation compressibles contre un assèchement excessif pouvant conduire, par suite de tassements dus au retrait, à des dégradations importantes des chaussées.

L'observation, durant la période de chantier, du fonctionnement du système de drainage a montré que le débit transitant par les drains est relativement important.

Ce débit, variable en fonction de l'avancement des travaux, diminue au fur et à mesure que les couches de chaussée se mettent en place.

Durant la période d'exploitation, ce débit variera en fonction du niveau d'entretien de la chaussée.

La réussite du système de drainage est subordonnée d'abord au soin durant la phase des travaux et ensuite à l'effort consentie dans le cadre de l'entretien de la chaussée et ses dépendances après mise en service.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] R. VAN GANSE et A.BRULL (1970) " Evaluation prévisionnelle des teneurs en eau des sols sous les chaussées " La technique routière XV.3/1970.
- [2] G. RAIMBAULT (1968) " Cycle annuel d'humidité dans une chaussée souple et son support " Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées n°145-Sep.Oct. 1986.
- [3] R. VAN GANSE (CRR) " Infiltration dans les chaussées, évaluation prévisionnelle " Symposium sur le drainage routier. Berne 1978.
- [4] P. SILVESTRE (1982) " La route et son environnement hydrique " Drainage F.A.E.R. 1.01.04.9.
- [5] CEDERGREN " Rapport sur la conception des systèmes de drainage interne pour chaussées d'autoroutes " FHA FF 1852/1970
- [6] W.P.M. BLAK D.CRONEY and J.C. JACOBS " Field studies of the movement of soil moisture " H.M.SO. London 1958.
- [7] J.L. NISSOUX " Le drainage en bande d'arrêt d'urgence " Symposium sur le drainage des routes, Berne 1978.
- [8] RICHARDS L.A. (1931) " Capillary conduction of liquides through porous medium ". Physics 1 (318-333)
- [9] VACHAUD G.(1969) " Analyses des profils hydriques et détermination de K(q). Bulletin du B.R.G.M. 2ème série, section III n°4 P.101-105.
- [10] A. DERRADJI (1989) " Simulation numérique des écoulements dans une chaussée avec ou sans dispositif de drainage latéral " Rapport interne Laboratoire Central des Ponts et Chaussées Nantes - France.