

# Évaluation spectroscopique des états de mouillage des chaussées

## Influence sur le frottement roue/sol

Alex COIRET

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

### RÉSUMÉ

Le niveau maximal de frottement des pneumatiques d'un véhicule sur une chaussée conditionne ses possibilités d'évolution en sécurité. La présence d'eau à l'interface pneumatique/chaussée est un facteur déterminant sur ce niveau, souvent dénommé « adhérence mobilisable ». La connaissance des états hydriques des chaussées est donc nécessaire à la compréhension des processus de dégradation de l'adhérence des véhicules qui y circulent.

Diverses techniques d'évaluation de ces états hydriques -ou états de mouillage- sont présentées. Une méthode spectroscopique dans le proche infrarouge est décrite et son adéquation à la mesure depuis un véhicule en ordre de marche est évaluée.

La pertinence de la mesure de ces états hydriques pour la détermination d'un niveau de dégradation de l'adhérence est ensuite estimée. À cette fin, des campagnes expérimentales ont été construites autour d'un matériel spécifique (Grip Tester) puis avec un véhicule léger.

DOMAINE : Route.

### ABSTRACT

*SPECTROSCOPIC EVALUATION OF PAVEMENT WETTING STATES:  
INFLUENCE ON WHEEL/GROUND FRICTION*

*The maximum level of vehicle tire friction on a pavement exerts an effect on the tire's potential to ensure driving safety. The presence of water at the tire/pavement interface constitutes a determinant factor of this level, which is often referred to as "mobilizeable skid resistance". Advance knowledge of the hydric states of pavements thus proves necessary to understanding the processes by which vehicle skid resistance deteriorates.*

*Various techniques for evaluating these hydric states – or wetting states – are exhibited herein. A spectroscopic method applied within the near infrared spectrum is described and its compatibility with measured values taken from a moving vehicle assessed.*

*The relevance of measurements obtained on these hydric states for determining a level of skid resistance deterioration is to be estimated next. In this aim, a series of experimental campaigns were built around a specific test device (the "Grip-Tester") and then applied using a passenger car.*

*FIELD: Roads.*

137

## ÉTAT DE MOUILLAGE DES CHAUSSÉES

### Problématique sécuritaire

Par temps de pluie, la dégradation du potentiel d'adhérence d'un véhicule sur une chaussée est une notion connue des usagers de la route. La formation et l'information, par le biais du code de la route et de la signalisation routière, concourent à cette connaissance de la dégradation de l'adhérence. Cependant, les conditions de réalisation du phénomène de glissement (terme générique) d'une chaussée mouillée et le niveau de risque associé sont paradoxalement rarement bien évalués.

En premier lieu, la dégradation du potentiel d'adhérence n'est souvent perçue par le conducteur que lorsqu'elle conduit à un glissement, c'est-à-dire que la demande d'adhérence dépasse l'offre d'adhérence. Une situation de perte de contrôle peut apparaître sans le bénéfice préalable d'un processus « d'apprentissage » (que l'on retrouve plutôt pour des phénomènes plus linéaires et répétables). Cette difficulté est renforcée par le fait que la dégradation de l'adhérence peut être élevée pour des revêtements très peu mouillés, quelque temps après un épisode pluvieux par exemple [1].

Également, dans le cas des fortes hauteurs d'eau et malgré un risque de glissance souvent bien perçu, le phénomène d'aquaplanage peut apparaître brusquement sans pouvoir être anticipé car il dépend aussi de la vitesse pratiquée et de la pression de contact\* [2, 3]. Les paramètres de texture (revêtement) et de sculpture (pneumatique) sont aussi influents, en relation avec les capacités de drainage du système [4, 5].

Pour estimer le risque de dégradation de l'adhérence, le conducteur n'a pas qu'une perception visuelle (chaussée mouillée) : en général, une diminution du couple résistant ressentie au volant (perception haptique) prévient l'approche des conditions limites d'adhérence, mais ce n'est pas toujours le cas, selon la conception du pneumatique [6].

L'évaluation des hauteurs d'eau sur les revêtements routiers présente ainsi un intérêt pour la compréhension de leur influence sur la contrôlabilité des véhicules. Une meilleure connaissance des phénomènes en jeu pourra contribuer à des préconisations constructives (routes, véhicules) ou des limitations d'usage (règles de circulation).

Enfin, un système embarqué réalisant ces évaluations pourrait informer le conducteur et les autres systèmes d'aide à la conduite d'un déséquilibre proche entre offre et demande d'adhérence. Selon la théorie - contestée - de « l'homéostasie du risque » [7-9], on pourrait voir, pour l'usage d'un tel système, un moyen de diminuer la *cible de risque* prise par les conducteurs (en contrepartie du *bénéfice* de temps gagné). Au lieu de s'intéresser à l'amélioration de performances permettant une prise de risque plus élevée, un système restrictif fondé sur la détection d'eau viserait ici à prévenir une prise de risque trop importante.

## Mesure des quantités d'eau pour l'estimation de l'adhérence

### Notion concernée de « l'adhérence »

L'adhérence ne peut être définie que pour un couple pneumatique-revêtement. La notion d'adhérence pour les pneumaticiens et les concepteurs de chaussées recouvre les mécanismes de frottement sec et visqueux, d'adhésion et d'indentation. À l'échelle globale de la zone de contact d'un pneumatique sur une chaussée, l'adhérence est définie par le rapport des efforts tangentiels à l'effort normal (ou charge verticale). Les manœuvres de freinage (accélération) et de braquage, essentielles à la conduite en sécurité, sont permises par l'exploitation respective des efforts tangentiels longitudinaux et transversaux.

On distingue l'adhérence mobilisable, ou potentiel maximal, de l'adhérence mobilisée qui est continuellement exploitée par le contact. Il existe aussi la notion d'adhérence conventionnelle qui résulte de la mesure de l'adhérence par un appareil approprié : elle sert de référence pour la planification des travaux de réfection, mais ne doit pas être confondue avec le potentiel maximal, lié à un couple pneumatique-revêtement [10].

### Dégradation de l'adhérence mobilisable

De nombreux facteurs conditionnent l'adhérence mobilisable : la texture du revêtement, la structure, la gomme et les sculptures du pneumatique, la surface et la pression de contact, mais aussi la présence éventuelle d'éléments à l'interface, dont l'eau [11-14].

L'impact de l'eau sur l'adhérence est complexe : si les fortes hauteurs d'eau peuvent conduire à une séparation complète du pneumatique et du revêtement (aquaplanage), de très faibles quantités d'eau, soit une simple humidification, peuvent concourir à une réduction de 40 % du potentiel d'adhérence par rapport à l'état sec [15].

Pour les fortes hauteurs d'eau, la caractéristique critique est le rapport de la drainabilité du couple pneumatique/chaussée au débit d'eau capté ; ce rapport dépend en particulier de la vitesse et de la hauteur d'eau. Pour les faibles quantités d'eau, la théorie de la lubrification associée aux éléments fins de la texture conditionnent la dégradation de l'adhérence.

Les systèmes d'aide à la conduite tels que les antibloquants ABS ou correcteurs de trajectoire ESP dépendent souvent de l'engagement d'une situation de conduite critique. De nombreuses recherches portent sur la détermination préventive du risque de perte d'adhérence [16-18]. On conçoit bien l'intérêt pratique d'un système de détermination anticipée de perte d'adhérence. Embarqué dans un

\* Selon Balmer et Gallaway [2], bien que Allbert et Walker [6] aient montré qu'en fait c'est plus la longueur de contact qui importe.

véhicule, il pourrait alerter le conducteur ou activer d'autres systèmes destinés à maintenir la contrôlabilité du véhicule (ESP, limitation d'allure, etc.). La connaissance de l'état hydrique des chaussées permet de déterminer un taux de dégradation de l'adhérence et c'est cette relation qui va être étudiée.

## MOYENS D'ÉVALUATION DES ÉTATS DE MOUILLAGE DES CHAUSSÉES

### Observables

L'état hydrique d'une chaussée est une notion générique large : les états sec, humide, mouillé, saturé et ruisselant en sont des descriptions subjectives [19] ; la quantification nécessite de faire appel à des mesures numériques portant sur les « hauteurs d'eau » ou « épaisseurs de film d'eau », selon les cas de figures.

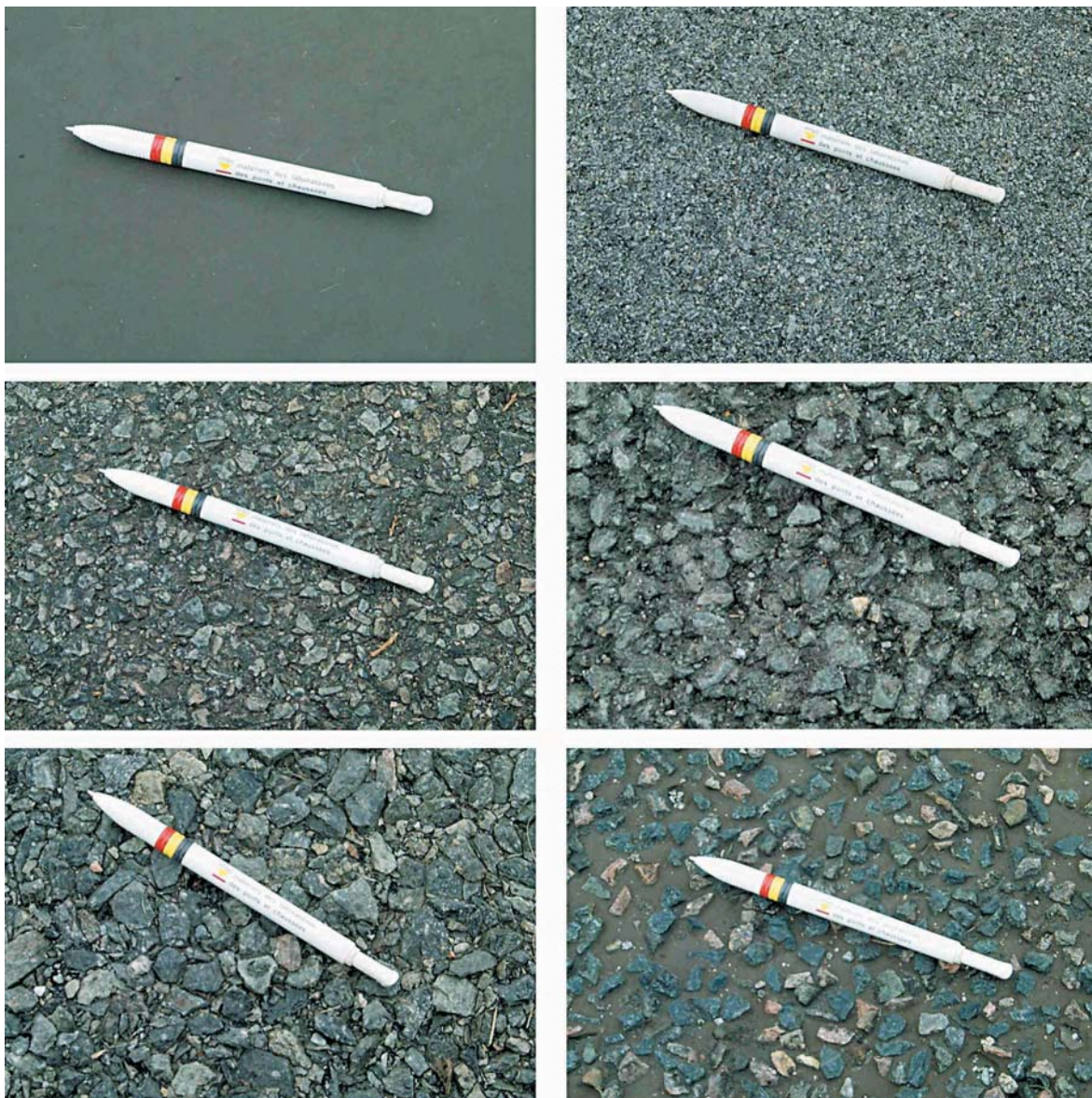
La difficulté de l'estimation d'un état hydrique tient principalement à la variété et à la non-uniformité des revêtements routiers. Les irrégularités géométriques (ornières ; Fig. 1) conduisent à des états hydriques très variables sur un revêtement. Dans ce contexte, Hight [20] a montré qu'une répartition transversale asymétrique entre les roues d'un véhicule nuit beaucoup à sa contrôlabilité. Les hauteurs d'eau sont aussi fonction des pentes latérales [21], en combinaison avec les pentes longitudinales [22, 23]. Enfin, la structure elle-même conditionne les débits et hauteurs en surface (revêtements drainants).

Les différences de texture (bétons de ciment ou enrobés bitumineux, semi-grenus, drainants, etc.) rendent la mesure assez délicate : une hauteur d'eau du même ordre de grandeur que l'échelle de texture impose de choisir une référence en hauteur par rapport à cette texture. On verra que, souvent, c'est la hauteur du plan surmontant les plus hauts granulats, sur une étendue donnée, qui est choisie (ex : limnimètres ; Fig. 2). Une large gamme de macrotextures est présentée sur la figure 3. D'après une importante campagne expérimentale [24] et en considérant que les intensités de pluie en France sont majoritairement inférieures à 25 mm/h, il a été montré que les ruissellements sur les routes françaises résultent essentiellement de défauts locaux de la géométrie (orniérage, affaissements).



□ **Figure 1**  
*Irrégularités géométriques conduisant à de fortes accumulations d'eau.*

□ **Figure 2**  
Forte macrotexture : nécessité d'un  
niveau de référence.



□ **Figure 3**  
Variété d'aspect de revêtements selon leur HS (hauteur au sable de gauche à droite et de haut en bas : 0 – 0,3 – 1 – 1,1 – 1,3 – 4,1, en mm).

## Diversité des moyens d'évaluation

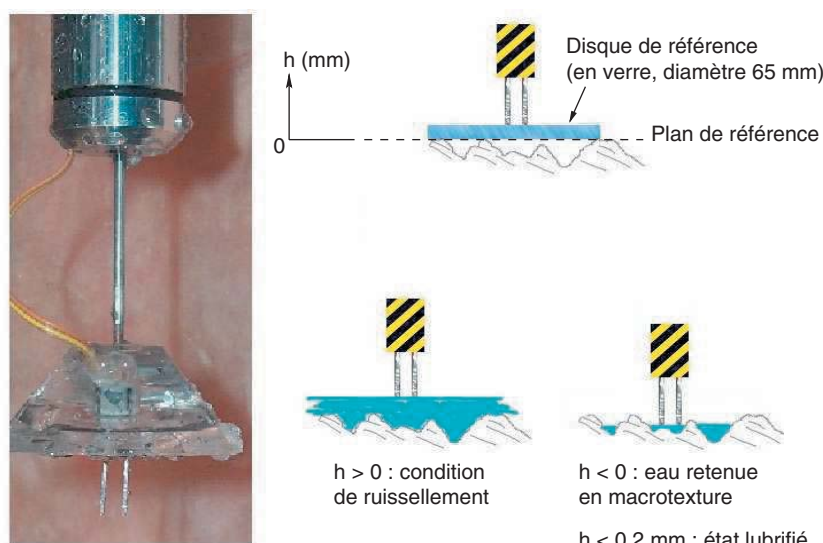
L'estimation des quantités d'eau pour la question de l'adhérence dépend de l'échelle choisie : pour un pneumatique, si la surface de contact est de l'ordre du décimètre carré à tout instant, il peut être nécessaire de s'intéresser à des zones plus étendues pour expliquer les processus de contact et les conditions initiales du bilan hydrique à l'interface pneumatique/chaussée. Le problème de l'aquaplanage met en évidence cette notion : l'étendue longitudinale d'une retenue d'eau intervient, en plus de son épaisseur. Inversement, la représentativité de mesures très ponctuelles devra être montrée envers l'adhérence mobilisable par un couple pneumatique/revêtement donné.

Le « limnimètre-lcpc » est un moyen de mesure des états hydriques développé par le LCPC. Il effectue une mesure très ponctuelle ( $10 \text{ mm}^2$ ). Au cours d'un mouvement vertical en direction d'un sol mouillé, un couple d'aiguilles permet la détection de la surface liquide par fermeture d'un circuit électrique, puis de la surface du sol par contrainte mécanique (Fig. 4). Une hauteur de référence est préalablement définie comme la surface de contact entre un disque de verre de 65 mm de diamètre et les plus hauts granulats du revêtement (important pour les fortes macrotextures ; cf. Fig. 4). La mesure, d'une précision d'un dixième de millimètre, dure toutefois près de trente secondes.

Les méthodes de prélèvement concernent souvent plusieurs dizaines de centimètres carrés. Pour la méthode expérimentée au LCPC, l'eau présente en surface d'un élément de revêtement est prélevée et quantifiée par rapport à la surface de prélèvement pour obtenir une hauteur moyenne ([25] ; Fig. 5a et 5b). La méthode est néanmoins à réserver aux films d'épaisseur uniforme et établie (après un épisode pluvieux ou à l'abri des précipitations). Sa précision est d'un demi-millimètre environ, ce qui est intéressant compte tenu de la simplicité de l'équipement nécessaire.

Les sondes à neutrons ne sont plus utilisées au LCPC (en raison du risque d'irradiation). Leur surface d'estimation est de l'ordre du décimètre carré. Elles utilisent la propriété qu'ont les neutrons rapides d'être ralentis préférentiellement par les atomes d'hydrogène. Une fois émis par une source, ces neutrons entrent en collision avec les noyaux d'hydrogène et perdent ainsi leur énergie cinétique. Une certaine proportion d'entre eux retourne vers la sonde et est mesurée pendant un temps de l'ordre de la minute.

L'analyse d'images peut permettre une évaluation d'une grande surface (de l'ordre du mètre carré), mais ne donne en général qu'une indication binaire d'état (sec/mouillé).



□ **Figure 4**

Élément de mesure d'un limnimètre et principe de référence géométrique aux plus hauts granulats.



□ **Figure 5**  
Méthode du prélèvement : matériel (a) ; mise en œuvre (b).

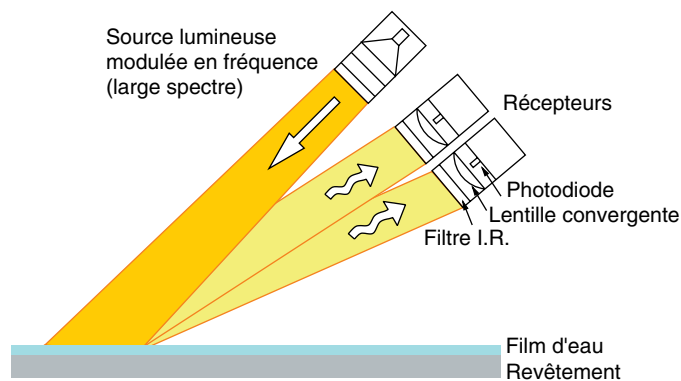
Enfin, sans être exhaustif, on montrera l'intérêt d'un système spectroscopique pour la mesure des états hydriques des revêtements routiers (type DOAS : Differential Optical Absorption Spectroscopy). Doté d'un temps de mesure d'un centième de seconde, le système présenté permet une mesure depuis un véhicule en mouvement et pourrait donc, à terme, compléter l'instrumentation embarquée des véhicules courants dans un contexte sécuritaire.

## SPECTROSCOPIE APPLIQUÉE AU DOMAINE DES CHAUSSÉES

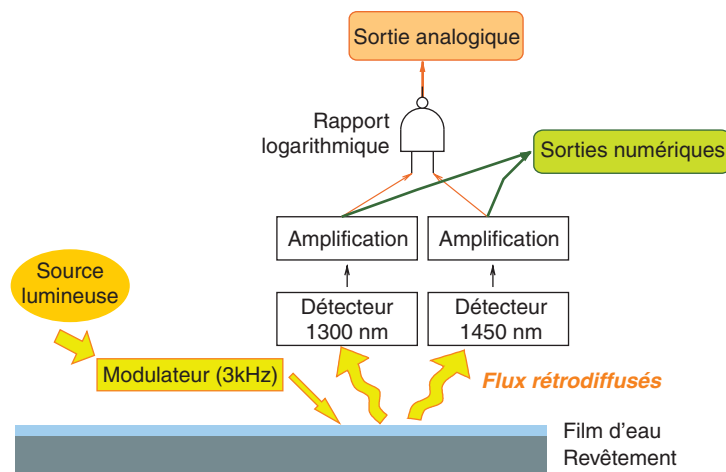
142

### Présentation

Dans la suite de cet article, on détaillera le fonctionnement et l'intérêt d'un système spectroscopique de mesure des états hydriques des chaussées. Ce système, baptisé « Aquasens » par son concepteur [26], est fondé sur les propriétés d'absorption spécifiques de l'eau pour des rayonnements situés dans le proche infrarouge. Un rayonnement lumineux est émis puis analysé après avoir été éventuellement altéré en milieu liquide et rétro-réfléchi par le revêtement routier. Le schéma de principe est donné sur la figure 6. L'analyseur infrarouge considère trois bandes d'onde étroites (80 nm) centrées sur 1 080, 1 300 et 1 450 nm. Les flux mesurés dans ces trois bandes permettent l'évaluation des états hydriques selon deux gammes de sensibilité : de 0 à 1 mm (Fig. 7) et de 0 à 10 mm de « hauteur d'eau ».



□ **Figure 6**  
Schéma de principe du système spectroscopique.



□ **Figure 7**  
Chaîne de mesure (pour la gamme de sensibilité de 0 à 1 mm).

## Principe de mesure

L'absorption radiative différentielle de l'eau est exploitée par le capteur entre 1 et 2  $\mu\text{m}$ , en infrarouge de courte longueur d'onde (Fig. 8 et 9).

Théoriquement, pour une épaisseur d'eau  $x$  et une longueur d'onde  $\lambda$ , le flux transmis est donné en fonction du flux incident  $\phi_0$  par :

$$\phi_{\text{trans}} = \phi_{x,\lambda} = \phi_0 e^{-\beta_\lambda x} \quad (1)$$

( $\beta_\lambda$  : coefficient de transmission relatif à la longueur d'onde  $\lambda$  ; cf. Fig. 9.)

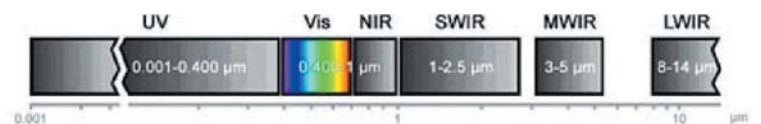
Cette relation découle de considérations physiques d'absorption. Si  $\alpha$  est la probabilité pour un photon d'être absorbé au sein d'une couche infinitésimale du milieu considéré, alors  $1 - \alpha$  est la probabilité associée de ne pas être absorbé, c'est-à-dire transmis à travers cette couche élémentaire. Sur deux couches successives, la probabilité de transmission devient  $(1 - \alpha)^2$  et, sur un nombre  $n$  de couches élémentaires, elle s'écrit  $(1 - \alpha)^n$ . Pour  $n$  tendant vers l'infini, cette expression converge vers  $e^{-\alpha \cdot n}$  et on retrouve bien le facteur de transmission relatif à  $\phi_0$  tel qu'il est présenté en (1).

En prenant le logarithme népérien pour chaque membre de (1), il vient :

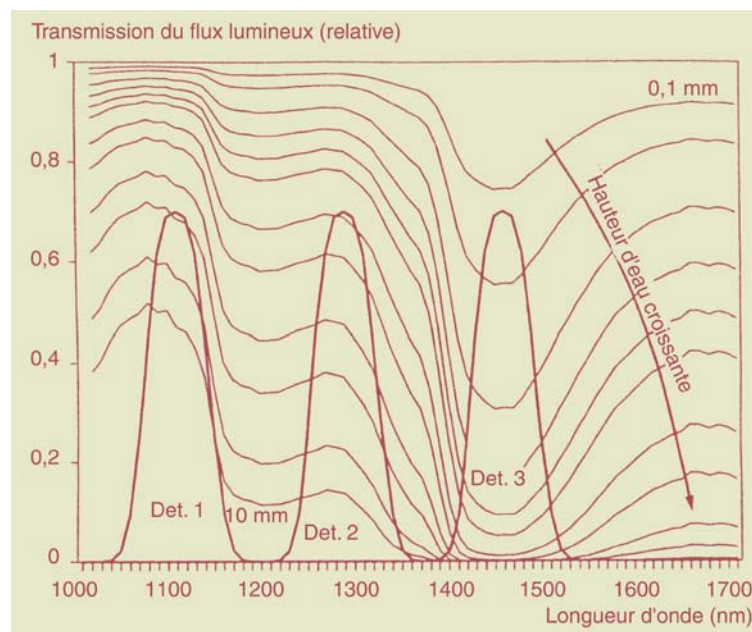
$$\ln \phi_{x,\lambda} = \ln \phi_{0,\lambda} - x \cdot \beta_\lambda \quad (2)$$

Pour le capteur présenté, si l'on s'intéresse aux deux bandes de longueur d'onde centrées sur 1 300 et 1 450 nm, pour la détermination de la voie sensible « 0 à 1 mm de hauteur d'eau », on obtient :

$$\begin{cases} \ln \phi_{x,1450} = \ln \phi_{0,1450} - x \cdot \beta_{1450} \\ \ln \phi_{x,1300} = \ln \phi_{0,1300} - x \cdot \beta_{1300} \end{cases} \quad (3)$$



□ **Figure 8**  
Gamme spectrale (Vis : visible - SWIR : infrarouge de courte longueur d'onde...).



□ **Figure 9**

Rapport de transmission de signal (réception/émission) en fonction de la longueur d'onde (nm) pour différentes épaisseurs de film d'eau (les trois bandes de détection sont indiquées).

En première approximation, on peut supposer que la source lumineuse a un spectre plat et uniformément atténué par l'atmosphère, c'est-à-dire que  $\phi_{0,1450} \approx \phi_{0,1300}$ . Pour ces deux bandes de transmission, et pour un trajet aller et retour au travers d'une épaisseur d'eau  $e$ , on obtient finalement :

$$e \approx \frac{\ln \left[ \frac{\phi_{2e,1450}}{\phi_{2e,1300}} \right]}{2(\beta_{1300} - \beta_{1450})} \quad (4)$$

Certaines approximations ont cependant été faites, dont les deux principales sont :

- ❶ l'absorption atmosphérique a été négligée devant l'absorption en élément liquide ;
- ❷ la surface du revêtement routier est considérée comme un corps émissif blanc ou gris, (un corps noir absorberait tout le flux incident tandis que tout autre corps privilégierait une bande de longueurs d'onde par rapport à l'autre).

Le premier point d'approximation renvoie au problème de rétrodiffusion [27] en cas de présence d'aérosols liquides dans l'atmosphère. La présence de pluie imposerait en toute rigueur de tenir compte de cette rétrodiffusion pour l'interprétation des flux lumineux captés.

Le deuxième point pose le problème de la colorimétrie et de son influence sur le rapport d'émissivité de la surface pour les différentes longueurs d'onde ( $\lambda = 1450$  et  $\lambda = 1300$  nm). Malgré le faible écart entre les longueurs d'onde utilisées, il conviendra de rester vigilant lors de l'usage de revêtements particuliers (marquages routiers réfléchissants, privilégiant des longueurs d'ondes très ciblées). Pour les surfaces à forte émissivité, selon le principe d'Huyghens-Fresnel, des réflexions multiples au sein du revêtement routier pourrait altérer la mesure (notion de sources lumineuses secondaires sphériques).

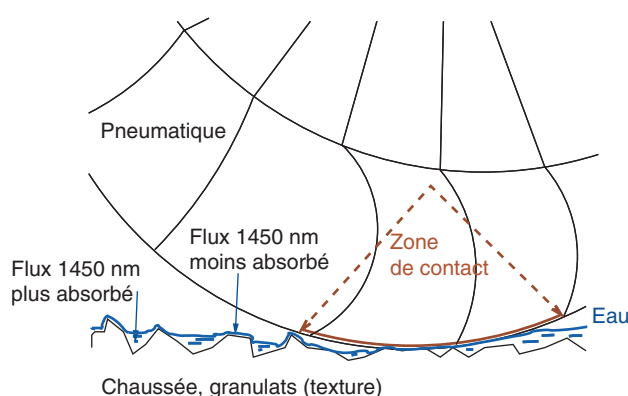
Finalement, le système spectroscopique détermine une hauteur d'eau d'après l'équation (4), par émission d'un rayonnement plat dans la gamme de longueurs d'ondes de 1 à 2  $\mu\text{m}$  et par mesure spectrale des flux renvoyés. Les niveaux détectés dans les bandes centrées sur 1080 nm et 1450 nm sont rapportés à un niveau commun (bande à 1300 nm) pour les calculs respectifs des niveaux d'eau sur les deux étendues de mesure : « 0 à 10 mm » et « 0 à 1 mm ».



## Correspondance en termes de hauteur d'eau

Si la zone de mesure est partiellement couverte d'eau, le signal correspondant aux zones les moins mouillées devient prépondérant (selon le concepteur ; Fig. 10). Cette « orientation » est adaptée à la représentation de l'adhérence, dont les mécanismes exploitent principalement les parties hautes des granulats.

En particulier, pour un revêtement comportant une assez forte macrotexture, les volumes inter-granulaires seront peu pris en compte car, d'une part ils sont optiquement masqués par les granulats et, d'autre part, les variations angulaires entre le flux incident et les parois non horizontales de ces volumes intergranulaires dégradent la rétro réflexion (flux piégé dans l'élément liquide ou réfléchi en dehors du cône de perception du capteur).



□ **Figure 10**  
Seuil de détection du capteur. Volumes d'eau mobilisables pour l'adhérence.

## Sensibilité de la mesure aux conditions d'usage et à l'environnement

Le système optique est conçu pour effectuer des mesures à une hauteur de 0,5 m au-dessus du revêtement dont on souhaite mesurer l'état de mouillage. Il doit par ailleurs être incliné de 45° par rapport à l'horizontale (cf. Fig. 6).

Le flux lumineux étant délimité par un cône, l'intensité d'éclairage du revêtement diminue lorsque la distance d'observation augmente. De même, le facteur de forme (en radiosité) de la surface éclairée diminue pour chacune des photodiodes d'analyse. On pourrait aussi prendre en compte l'atténuation atmosphérique. Cependant, ces altérations affectant probablement les trois gammes d'onde de manière équivalente, la dégradation portera principalement sur le rapport final signal/bruit.

La variation de l'angle d'observation est aussi critique. Pour une incidence trop rasante, le flux lumineux sera plus réfléchi dans une direction opposée au capteur, et faiblement transmis dans l'élément liquide. La rétro réflexion et la double traversée du fluide nécessaires à l'évaluation de l'épaisseur du film d'eau imposent donc un respect assez strict de l'angle d'observation du capteur.

Dans les paragraphes suivants, l'influence de ces paramètres va être déterminée.

### Sensibilité de la mesure à la variation de la distance d'observation

Une première expérience de sensibilité consiste à faire varier la distance d'observation du capteur, lors d'une mesure d'un état hydrique stabilisé, en conservant les autres paramètres constants (centre de la zone de focalisation sur le revêtement, angle d'observation). Il est donc nécessaire de reculer et d'élever le capteur en incréments égaux (observation sous 45°).

Sur les figures 11 à 13, les tracés en traits continu et tireté sont respectivement les mesures en voie normale (0-10 mm) et en voie sensible (0-1 mm) du capteur en fonction de sa variation de hauteur, de - 8 cm à + 10 cm ( $\Delta z$ , mais aussi  $-\Delta x$ ). Les symboles indiquent les valeurs discrètes enregistrées pour les trois cellules photosensibles du capteur.

Influence de la hauteur du capteur type SPIR  
 État de mouillage faible (~0,5 mm)  
 Surface macrolisse, microrugueuse

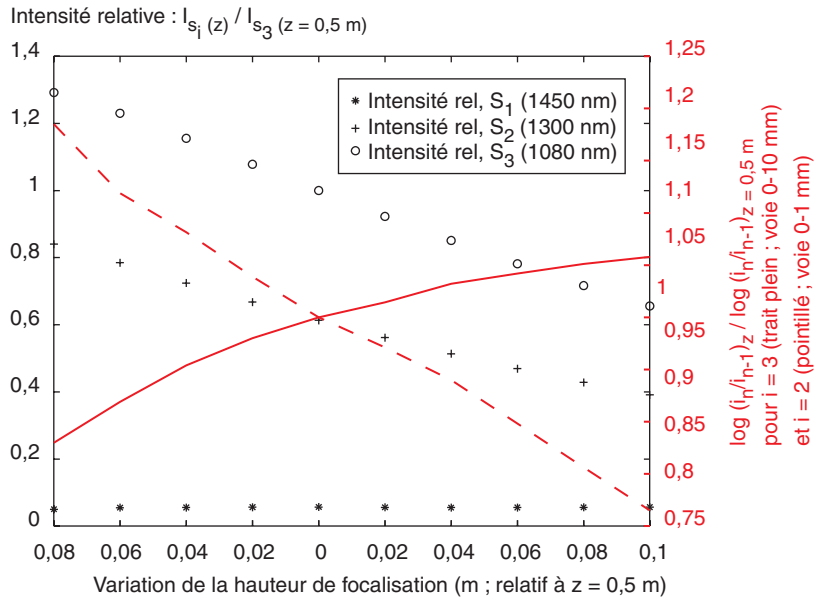


Figure 11

Flux lumineux mesurés et hauteurs d'eau calculées : étude de l'influence de la hauteur du capteur.

Influence de la hauteur du capteur type SPIR  
 État de mouillage élevé (~ 5 mm)  
 Surface macrolisse, microrugueuse

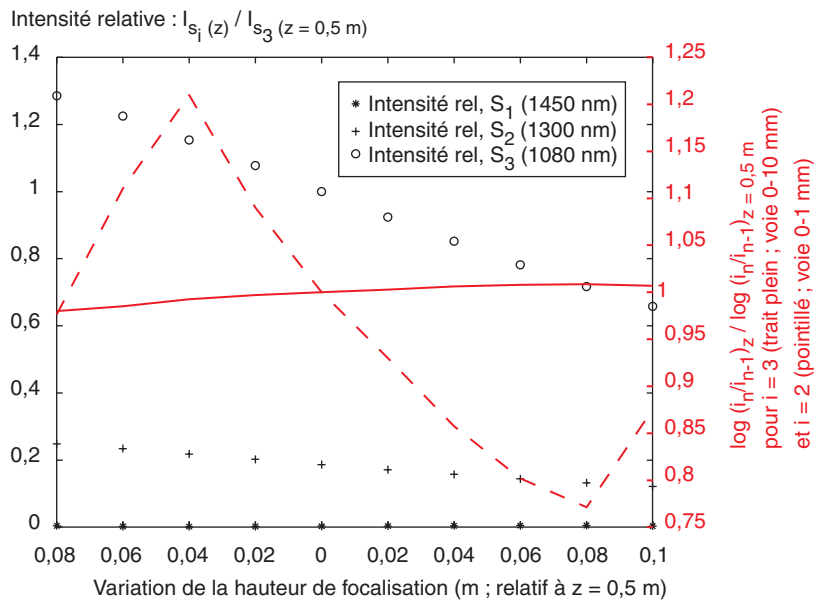
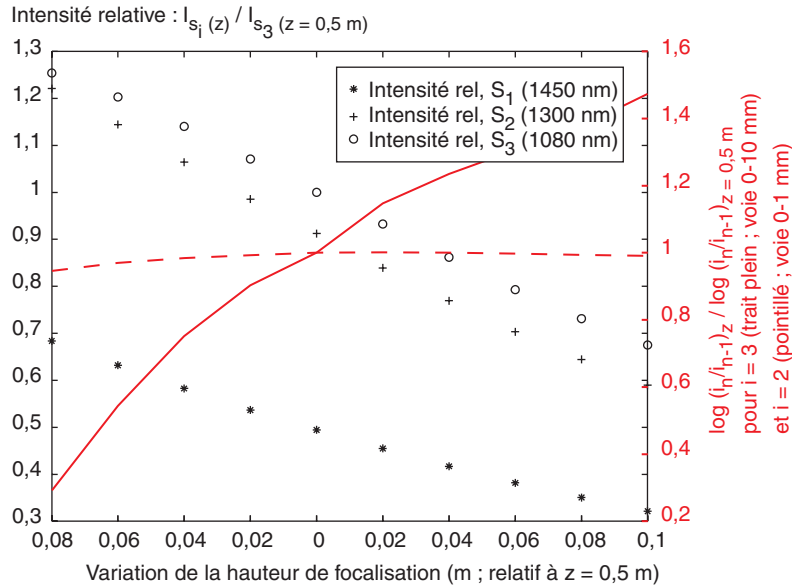


Figure 12

Flux lumineux mesurés et hauteurs d'eau calculées : étude de l'influence de la hauteur du capteur.

Influence de la hauteur du capteur type SPIR  
 État de mouillage très faible (~0,1 mm)  
 Béton bitumineux Semi-grenu



■ **Figure 13**

Flux lumineux mesurés et hauteurs d'eau calculées : étude de l'influence de la hauteur du capteur.

■ Dans un premier temps, un revêtement de référence, macrolisse et microrugueux (une plaque en PVC gris) est faiblement mouillé : hauteur d'eau de 0,5 mm. Le graphique de la figure 11 montre les variations des flux lumineux mesurés par les trois cellules photosensibles autour des longueurs d'onde 1 080, 1 300 et 1 450 nm (proportionnels aux coefficients de transmission ; cf. Fig. 9).

Les intensités des flux  $S_2$  et  $S_3$  (symboles « + » et « o ») diminuent lorsque la distance d'observation augmente, en accord avec les remarques générales précédemment faites. Le flux  $S_1$  (symbole « \* ») reste constant et très faible (coefficient de variation de 3 %) ; il semble ici que les atténuations par absorption dans l'eau prédominent sur les autres phénomènes (facteurs de forme optiques, absorption atmosphérique) ; l'eau absorbe en effet une part importante du flux pour la longueur d'onde considérée (mouillage optimal pour l'étendue de mesure).

Pour les voies  $S_2$  et  $S_3$ , les phénomènes « secondaires » sont sensibles et induisent des variations de 40 % et 60 % sur les intensités lumineuses mesurées, et cela pour 30 % de variation de la hauteur du capteur autour de sa position de référence. Cependant, l'estimation des hauteurs d'eau est fondée sur une analyse différentielle et les effets de ces variations sont ainsi partiellement compensés. La voie 0-10 mm ne souffrira ainsi « que de » 15 % de variation.

Bien que cela puisse paraître contradictoire, la stabilité de la voie  $S_1$  ne permet pas une compensation comparable pour la détermination du niveau de sortie « 0-1 mm » : la même variation de hauteur a ainsi une influence de 35 % sur ce niveau (composition  $S_1$  et  $S_2$ ).

■ Dans un second temps, le mouillage est porté à 5 mm environ. Le graphique de la figure 12 montre une très faible intensité  $S_1$ . En fait, le signal  $S_1$  présente des fluctuations importantes avec un coefficient de variation de 38 %. Le logarithme du rapport  $S_2/S_1$ , servant d'estimateur pour la voie « 0-1 mm », représente ces déviations (45 % environ). Le trop haut niveau d'eau conduit à des valeurs du signal  $S_1$  très faibles et bruitées (limite basse de sensibilité des photosites). Notons que cette voie d'analyse 0-1 mm est ici « utilisée » largement hors de sa plage normale.

Le signal  $S_2$  est peu influencé par la variation de hauteur (absorption importante, forte devant des phénomènes secondaires). L'analyse différentielle avec la voie  $S_3$  conduit à une influence faible de la variation de hauteur du capteur sur l'estimation du niveau d'eau en gamme « 0-10 mm » : de l'ordre de 3 %.

Un béton bitumineux a aussi été employé. En mouillage très faible (cf. Fig. 13), de l'ordre du dixième de millimètre d'épaisseur de film d'eau, les signaux  $S_1$  et  $S_2$  sont affectés de manière identique par la

variation de distance d'observation. Il s'ensuit une très bonne régularité de la mesure en voie « 0-1 mm ». Le signal  $S_3$  est relativement faible et conduit à une estimation imprécise, mais attendue, en voie « 0-10 mm » (fort bruit, gamme sous-employée). Pour un mouillage important, de 5 mm de hauteur d'eau, une expérience a montré que les signaux  $S_2$  et  $S_3$  sont affectés de manière semblable, conférant une insensibilité de la voie 0-10 mm à la variation de la distance d'observation.

### Sensibilité de la mesure à la variation de l'angle d'observation du capteur

Pour les milieux transparents, on définit en optique l'indice de réfraction comme étant le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide à sa vitesse dans le milieu considéré. Fermat a montré qu'un rayon lumineux pénétrant dans un milieu moins dense s'éloigne de la normale à la surface de séparation. Il existe un angle d'incidence, appelé angle limite, pour lequel le rayon réfracté forme un angle de  $90^\circ$  avec la normale à la surface de séparation des milieux. Si l'angle d'incidence est supérieur à l'angle limite, le phénomène de transmission à travers l'interface ne se réalise plus : la réflexion est totale. Cet angle  $\theta$  est déterminé à partir de la loi de Descartes,  $\sin \theta = 1/n$ , où  $n$  est le rapport des indices de réfraction des deux milieux.

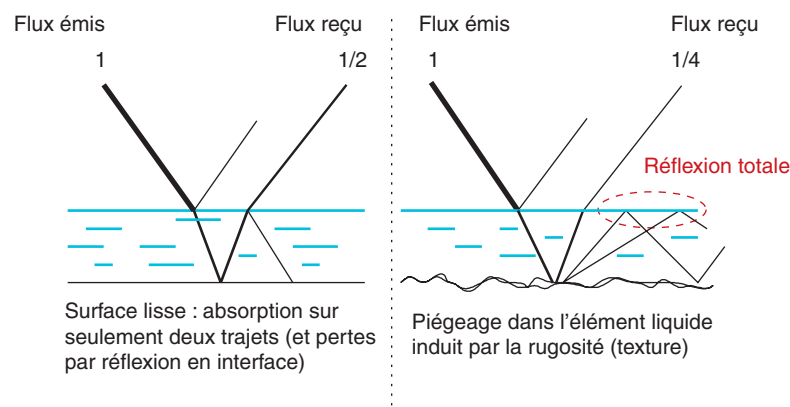
Pour le couple air/eau, ce rapport  $n$  est égal à  $4/3$  et l'angle limite de réfraction est d'environ  $48^\circ$ . Pour un flux lumineux émis d'un volume d'eau vers l'air, seuls les rayons formant un angle à la normale de l'interface compris entre  $0^\circ$  et  $48^\circ$  sortiront de l'eau.

Pour l'application considérée, si le capteur éclaire la surface liquide en lumière trop rasante, le flux risque d'être piégé dans le film d'eau après déviation, par la texture, des rayons en dehors du cône de demi-angle de  $48^\circ$ . Le signal utile risque alors d'être affaibli [28] (Fig. 14).

Cela implique que la présence de rugosité (micro/macro texture) peut conduire à une mauvaise évaluation de l'état hydrique. Le phénomène en cause conduit à l'assombrissement des surfaces rugueuses lorsqu'elles sont mouillées : par exemple un tableau d'école en ardoise ou un revêtement routier bitumineux, etc. [29]. Cet effet sera sans doute peu sensible pour les mesures puisque toutes les longueurs d'ondes analysées sont affectées de manière équivalente (sauf revêtement à émissivité spéciale, de type « marquage routier »).

Expérimentalement, l'effet de la variation d'angle a été étudié pour deux états de mouillage sur un support en PVC gris : hauteurs d'eau de 5 mm et de un millimètre.

Pour les fortes hauteurs d'eau (Fig. 15), la voie « 0-10 mm » du capteur n'est sous-évaluée que d'environ 10 % lors d'une incidence quasi-normale ( $8^\circ$ ) et que de 3 % lors d'une incidence de  $55^\circ$  (positionnement un peu trop rasant). La voie « 0-1 mm » est très affectée, ce qui n'est pas surprenant, compte



□ **Figure 14**  
Association texture/diffusion/réflexion totale.

Influence de l'angle du capteur type SPIR  
 État de mouillage élevé (~5 mm)  
 Surface macrolisse, microrugueuse

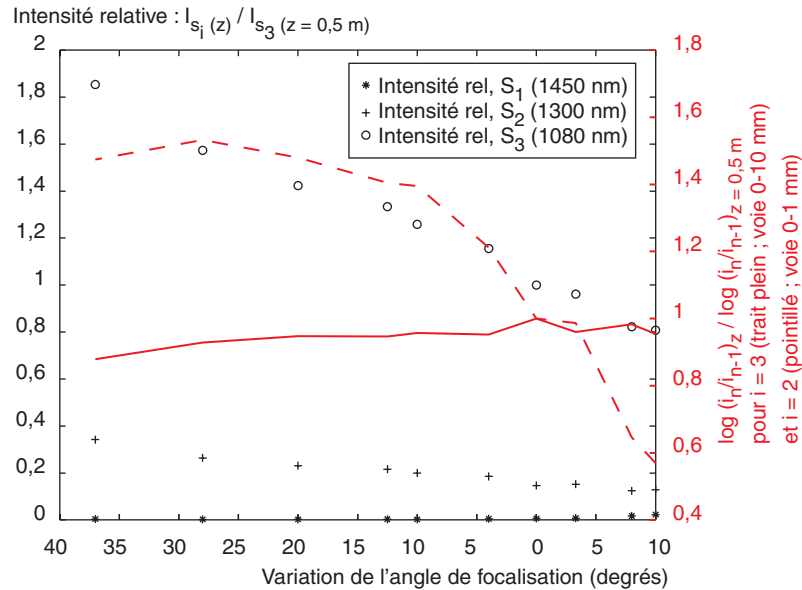


Figure 15

Flux lumineux mesurés et hauteurs d'eau calculées : étude de l'influence de l'inclinaison du capteur.

tenu que l'absorption est saturée pour la longueur d'onde 1 450 nm. (résultats présentés en fonction de l'angle d'incidence à la normale de la surface liquide).

Pour des faibles hauteurs d'eau appliquées sur le revêtement, le capteur s'est montré très affecté par une incidence légèrement rasante (55° au lieu de 45°) : la sous-évaluation, en voie 0-1 mm, peut atteindre 35 %...

### Variation des paramètres de placement du capteur : synthèse

Le mode différentiel de l'analyse permet de s'affranchir des variations de distance d'observation, dès lors que les voies combinées sont affectées de manière équivalente. C'est le cas pour un mouillage important si on s'intéresse à la voie 0-10 mm. C'est aussi le cas pour un mouillage très faible, en voie 0-1 mm. Les limites de détection (sensibilité basse des photosites) ont été montrées (voie 0-1 mm sur les figures 12 et 15).

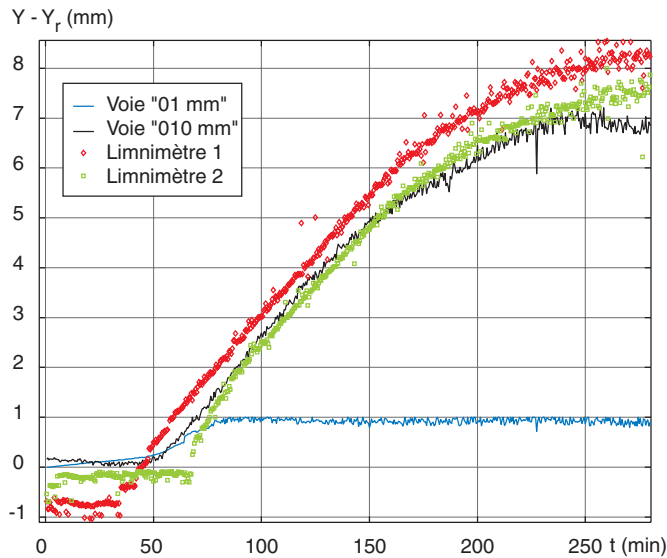
Pratiquement, la plage basse de chaque « voie » d'analyse permet un usage en s'affranchissant des variations de distance (0-0,3 mm et 1-4 mm pour les couples S<sub>1</sub>/S<sub>2</sub> et S<sub>2</sub>/S<sub>3</sub>).

En première approche, la sensibilité du couple de photodiodes S<sub>2</sub>/S<sub>3</sub> autorise des variations angulaires importantes pour l'estimation des fortes hauteurs d'eau. Par contre, l'estimation des faibles hauteurs d'eau nécessite un respect plus strict de la position angulaire.

Enfin, il n'a pas été trouvé de comportement très différent entre les deux types de revêtement, avec et sans macrotecture.

### Mesures comparatives limnimètres – système spectroscopique

Des essais comparatifs entre le capteur optique et des limnimètres ont été effectués pour cinq plaques d'essais de formulations différentes [30]. Un système de rétention périphérique a permis d'obtenir des hauteurs d'eau de l'ordre de 10 mm sur une plaque soumise à une pluie artificielle. Les décalages mesurés sur la gamme « 0,5-5 mm » de hauteur d'eau (notée Y-Y<sub>p</sub>) sont imputables aux différences d'altitude et d'étendue des surfaces prises en compte (non-planéité du revêtement, mesure locale ou moyennée ; exemple sur la figure 16). Le taux de variation est cependant comparable. Au-delà de



□ **Figure 16**  
Hauteurs d'eau mesurées lors d'un épisode de pluie artificielle (plaque d'enrobé).

5 mm, le capteur optique présente une non-linéarité (sous-estimation logarithmique de la hauteur réelle, mesurée par les limnimètres ; la voie  $S_2$  d'analyse n'est plus utilisée de manière optimale car on se rapproche de sa saturation).

Les niveaux inférieurs à 0,5 mm ne peuvent pas être évalués par les limnimètres. Pour ces faibles niveaux nous préférons une comparaison directe avec l'adhérence (*cf.* partie suivante). Enfin, le système spectroscopique affiche une sous-évaluation forte (~ 20 %) en présence d'un arrosage à très fines gouttes (brouillard). On pouvait s'attendre à ce comportement lié à la rétrodiffusion en atmosphère saturée. La présence de gouttes de taille moyenne est moins critique.

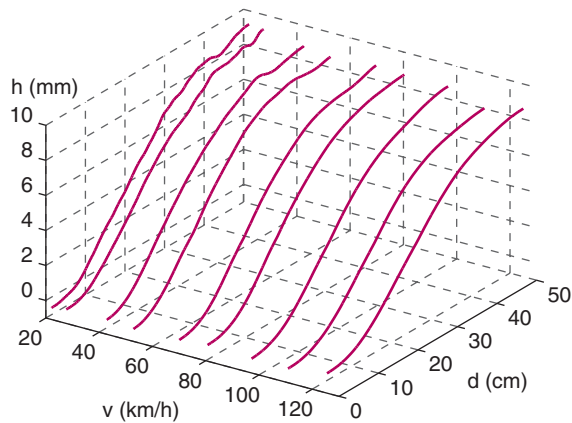
### Mesure des états de mouillage en situation embarquée

Des mesures ont été réalisées avec le système optique fixé sur un véhicule en mouvement de translation par rapport à plusieurs plaques d'essai inclinées, linéairement recouvertes d'eau (Fig. 17). Les hauteurs d'eau ont été mesurées avec une précision d'environ 5 % pour une gamme de vitesses relatives allant de 5 à 110 km/h (exemple sur la figure 18). L'imprécision provient essentiellement des écarts transversaux du profil de mesure, associés à un profil transversal de la plaque « en cuvette ». On note toujours une sous-estimation logarithmique des niveaux pour  $h > 5$  mm.

□ **Figure 17**

Dispositif de mesure embarqué employé sur un revêtement semi-immersé (bac noir).





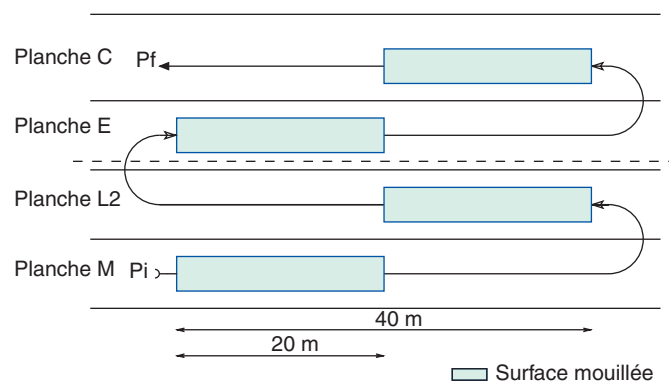
□ **Figure 18**  
Hauteurs d'eau mesurées  $h$  (mm) en fonction de la vitesse  $v$  (km/h) de déplacement relative et de la position longitudinale  $d$  (cm) sur la plaque partiellement immergée.

## NIVEAU D'ADHÉRENCE EN FONCTION DES ÉTATS DE MOUILLAGE

### Relation état de mouillage/adhérence conventionnelle

Les faibles hauteurs d'eau, jusqu'au concept de simple lubrification, ne sont pas quantifiables par les matériels usuels du LCPC. On a souhaité vérifier si le spectroscope permettait la distinction de plusieurs états de mouillage lors du séchage ultime de divers revêtements. Une expérience a été réalisée sur quatre revêtements de la piste de glissance du LCPC. Après un mouillage initial conduisant à une hauteur d'eau moyenne de 1 mm, des mesures d'adhérence par Grip Tester et de niveau d'eau ont été effectuées selon le parcours décrit sur la figure 19 et poursuivies en boucle jusqu'à l'assèchement complet (montage expérimental sur la figure 20).

Pour l'ensemble des planches d'essais, l'état hydrique est associé à un niveau dégradé constant d'adhérence sur une durée d'environ 45 min (assèchement naturel ; Fig. 21). Cette constance dénote l'existence d'une hauteur d'eau critique au-dessus de laquelle le niveau d'adhérence est invariant (dans la limite de l'apparition du phénomène d'hydroplanage). Ce résultat est en accord avec de nombreuses recherches [1, 31] (Fig. 22).

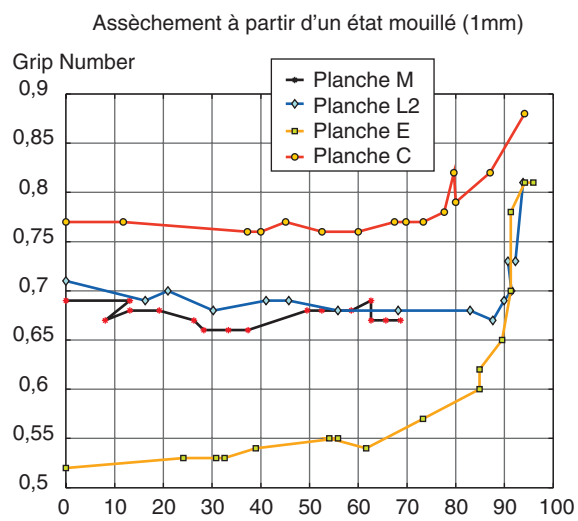


□ **Figure 19**  
Parcours de mesure, sur les quatre revêtements choisis.

**Figure 20**  
 Dispositif expérimental :  
 capteur Aquasens (projecteur et  
 récepteurs accolés)  
 monté sur un Grip Tester.

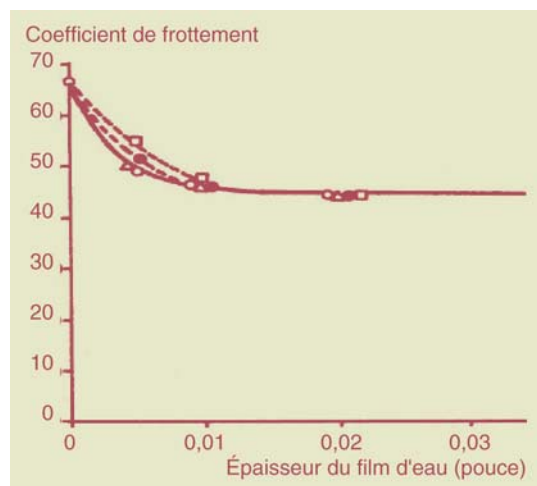


**Figure 21**  
 Résultats de l'expérience portant  
 sur la corrélation du niveau d'adhérence  
 et de l'état de mouillage.



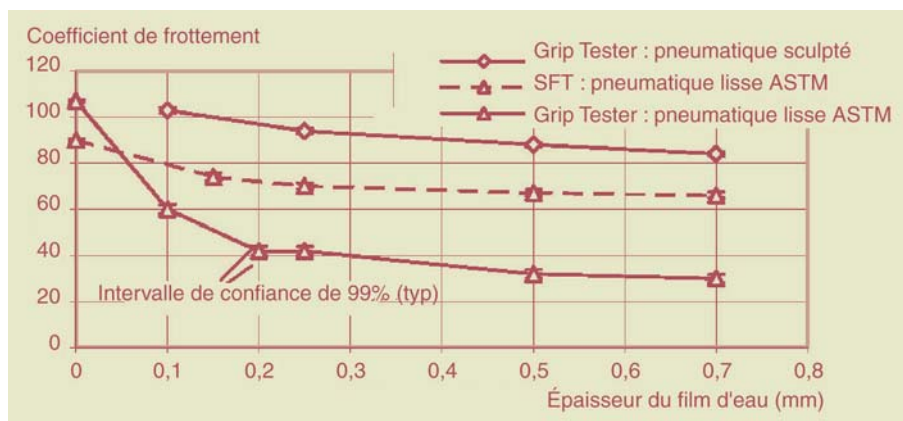
Assèchement relatif (%), mesure capteur optique AQUASENS  
 Intervalles de temps en minutes :  
 5, 4, 4, 4, 7, 4, 8, 4, 13, 7, 8, 9, 6, 7, 8 (total : 1h38')

**Figure 22**  
 Hauteur d'eau critique ([31]).





Excepté pour la planche M, insuffisamment asséchée, les niveaux d'adhérence croissent à partir de 70 à 90 % d'assèchement réalisé, jusqu'à l'état sec. Les rapports entre les niveaux d'adhérence dégradés et optimaux sont compris entre 68 et 88 % environ. En comparaison, une étude [32] avec un Grip Tester sur piste aéronautique a conduit à un rapport important de 28 % (Fig. 23 ; revêtement à faible macrotexture sans doute). L'usage d'un pneumatique sculpté ramène ce rapport à 80 %, ce qui confirme l'intérêt (compensateur) des pneumatiques sculptés sur revêtements à faible macrotexture.



□ **Figure 23**  
Importance du type de pneumatique ([32]).

Il est intéressant de noter que plus la macrotexture est faible (planche L2 à très faible macrotexture ; cf. Fig. 21), plus le point de transition de recouvrement de l'adhérence est à un niveau d'assèchement élevé. En effet, une surface lisse, associée au pneumatique lisse du Grip Tester, ne permet pas un bon drainage et n'autorise qu'une récupération tardive de l'adhérence, pour très peu d'eau.

## Relation état de mouillage/adhérence mobilisable par un véhicule léger courant

Les performances en freinage d'urgence d'un véhicule instrumenté\* ont été mesurées pour des pneumatiques d'usure et de gommes variées, sur différentes pistes du LCPC, avec plusieurs niveaux de mouillage et trois vitesses de référence.

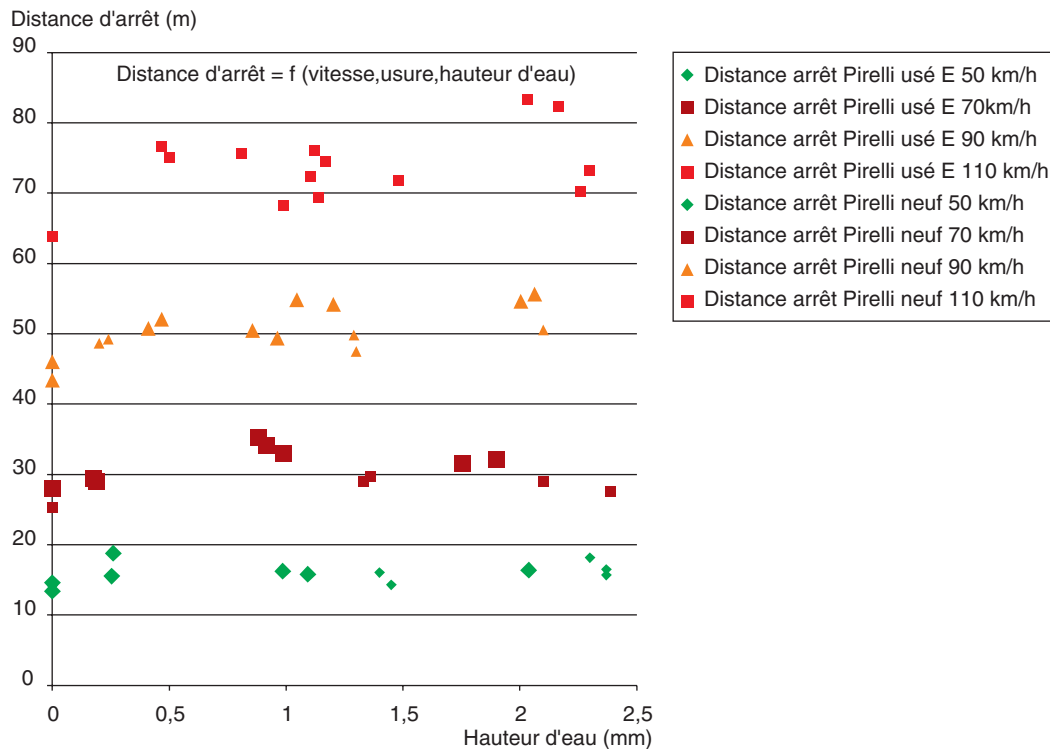
On peut extraire quelques résultats de cette campagne pour vérifier si un véhicule complet présente un comportement semblable à celui attribué au pneumatique lisse et de petite taille du Grip Tester (résultats de la figure 21).

La vitesse est le facteur le plus influant, pour des considérations énergétiques, sur l'augmentation des distances d'arrêt (Fig. 24 ; séparation forte et non linéaire des groupes de données 50/70/90 km/h). L'usure des pneumatiques n'altère pas les distances d'arrêt sur revêtement sec, ni sur revêtement mouillé dans le cas des faibles vitesses (50 km/h).

L'influence des hauteurs d'eau sur les distances d'arrêt est comparable à celle déterminée pour le Grip Tester : une dégradation marquée apparaît dès les premiers niveaux de mouillage (< 0,5 mm) et se maintient, presque sans évoluer, pour les états de mouillage plus élevés (si l'on reste en deçà des niveaux correspondant au phénomène d'hydroplanage).

Cette approche illustre l'importance des combinaisons de paramètres : état hydrique, vitesse, textures. Elle confirme l'existence d'une dégradation d'adhérence dès que le revêtement est humide et la relative invariance de cette dégradation selon l'épaisseur du film d'eau.

\* Peugeot 307, système ABS actif, pneumatiques de taille identique à la monte d'origine (2003).



□ **Figure 24**

Distances d'arrêt en fonction de la hauteur d'eau (mm), de la profondeur moyenne de sculpture des pneumatiques (mm), de la vitesse initiale (km/h), sur un revêtement BBSG (planche « E »).

## CONCLUSIONS

La détermination des niveaux d'adhérence mobilisable est une voie de recherche très active, avec des applications à moyen terme en sécurité des transports terrestres. La connaissance des états hydriques des chaussées est un élément important pour ces recherches. La difficulté de leur prédiction amène à examiner la question de la mesure directe, depuis un véhicule en ordre de marche. Dans ce contexte, la spectroscopie infrarouge différentielle permet une mesure fiable des niveaux d'eau entre 1 et 5 mm. Certains paramètres de placement du capteur sont influents, mais un montage sur un véhicule ne semble pas poser de problème particulier (variations d'angle, de hauteur). Les faibles états hydriques sont aussi accessibles, bien que plus sensibles au paramétrage géométrique. Il a été montré que plusieurs états peuvent être distingués entre un faible mouillage et l'état sec, auxquels on associe respectivement un état d'adhérence dégradé asymptotique et l'état sec optimal. Le procédé de mesure peut donc servir d'indicateur d'altération de l'adhérence, pour une surface donnée. Le capteur commercial retenu s'est avéré adapté à l'usage sur revêtements routiers, tout en permettant un accès aux valeurs brutes mesurées, avant traitement. L'intérêt de ce type de mesure optique est conforté par de nombreux équipementiers/constructeurs automobiles qui travaillent à l'intégration de versions à bas coût de capteurs optiques pour l'estimation de l'adhérence mobilisable.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] KULAKOWSKI B.T., HARWOOD D.W., Effect of Water-Film Thickness on Tire-Pavement Friction. Predicting surface subsidence from basic soil tests, *ASTM PT 1031*, 1990, pp. 50-60.
- [2] BALMER G.G., GALLAWAY B.M., Pavement Design and Controls for Minimizing Automotive Hydroplaning and Increasing Traction, *Friction interaction of tire and pavement*, *ASTM STP 793*, Meyer/Walter Eds, 1983, pp. 167-190.

- [3] NAVIN F., Hydrolplaning and accident reconstruction, *Accident Reconstruction SP1083*, vol. 950138, **1995**.
- [4] BOND R., LEES G., Road Surface Bulk Water Drainage – A theoretical Study, *Tire Science and Technology*, TSTCA, vol. 6, **2**, **1978**, pp. 125-158.
- [5] HORNE W.B., YAGER T.J., IVEY D.L., Recent studies to investigate Effects of Tire Footprint Aspects Ratio on Dynamic Hydroplaning Speed, *The Tire Pavement Interface*, **ASTM STP 929**, Pottinger and Yager, Eds., Philadelphia, **1986**, pp. 26-46.
- [6] ALLBERT B.J., WALKER J.C., Tyre to wet road friction at high speeds, *Proc Instn Mech Engrs*, vol. 180. Pt.2A, **4**, **1966**, pp. 105-121.
- [7] WILDE G., The theory of risk-Homeostasis : implication for safety and health, *Risk Analysis*, **2**, **1982**, pp. 209-255.
- [8] WILDE G., Target Risk, *PDE Publications ISBN 0-9699124-0-4* (disponible aussi à l'URL <http://pavlov.psyq.queensu.ca/target/>), **2001**.
- [9] MCKENNA F.P., In defence of conventional safety measures : A reply to G.J.S. Wilde, *Journal of Occupational Accidents*, vol. 11, **3**, **1990**, pp. 171-181.
- [10] AIPCR/PIARC, *Inventaire des appareils de mesure des caractéristiques de surface des chaussées*, Association Internationale Permanente des Congrès de la Route, **1995**.
- [11] GOLDEN J.M., Hysteresis and lubricated rubber friction, *Wear*, vol. **65**, **1980**, pp. 75-87.
- [12] FAN S.-B., Contribution à l'analyse des phénomènes liés à l'adhérence entre le pneumatique et la chaussée mouillée, *Thèse de l'Université de Nantes*, École nationale supérieure de mécanique, **1990**.
- [13] *Le Pneu, L'adhérence*, Société de technologie Michelin, septembre **2000**.
- [14] EDWARDS J.B., Motorway speeds in wet weather : the comparative influence of porous and conventional asphalt surfacings, *Journal of Transport Geography*, **10**, **2002**, pp. 303-311.
- [15] COIRET A., RAKOTONDRA SOLO J.-M., Estimation de l'influence de l'état hydrique des chaussées sur l'adhérence des véhicules, *Journées Sciences de L'Ingénieur*, colloque du LCPC, Dourdan, France, **2003**, 6 p.
- [16] POHL A., STEINDL R., REINDL L., The « Intelligent Tire » Utilizing Passive SAW Sensors-Measurement of Tire Friction, *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, vol. 48, **6**, **1999**.
- [17] GUSTAFSSON F., Slip-based Tire-Road Friction Estimation, *Automatica*, vol. 33, **6**, **1997**, pp. 1087-1099.
- [18] HIGASHIKAGE H., TAKAGI J., SHINMOTO Y., OGATA S., *Evaluation of the slipperiness of tire-to-road by using ground view sensor*, OMRON Corporation, Kyoto, Japan, **1997**.
- [19] YAGER T., PHILLIPS W.P., HORNE W., A Comparison of Aircraft and Ground Vehicle Stopping Performance on Dry, Wet, Flooded, Slush-, Snow-, and Ice-Covered Runways, *NASA Technical Note*, **TN D-6098**, **1970**.
- [20] HIGHT P.V., FUGGER T.F., MARCOSKY J. & VARAT M., Asymmetric Water Drag on Vehicle Trajectory and Human in Safety and the Automobile. *Selected Papers from Autotech'93*, Mechanical Engineering Publications, Suffolk, United Kingdom, **1994**, pp. 71-80.
- [21] KHAN A.M., BACCHUS A. & HOLTZ N.M., Multilane Highway Design Crossfall and Drainage Issues, *Transportation Research Record*, **1471**, Washington, D.C., **1994**, pp. 1-9.
- [22] GALLAWAY B.M., ROSE J.G., The effects of rainfall intensity, pavement cross slope, surface texture, and drainage length on pavement water depths, Texas Transportation Institute, *Research Report*, **138-5**, **1971**.
- [23] <http://www.johncglennon.com>
- [24] GUILLEMIN R., *Mouillage des chaussées*, Rapport technique, Predit2, APTP, sujet 2., **2002**, 46 pages.
- [25] LAGANIER R., *Mesure de la hauteur d'eau moyenne en surface de chaussées. Méthode du prélèvement*, Note technique LCPC, **1999**.
- [26] HOLZSWARTH F., EICHHORN U., Non-Contact Sensors for Road Conditions, *Sensors and Actuators A : Physical* 37-38, 0924-4247, **1993**, pp. 121-127.
- [27] MONDELAIN D., *Lidar linéaire et non linéaire dans l'infrarouge moyen*, Thèse, université Lyon I, **2001**.
- [28] COURTY J.-M., KIERLIK E., Réflexions sur la réflexion, *Pour la science*, **296**, **2002**, pp. 106-107.
- [29] LEKNER J., DORF M.C., Why some things are darker when wet ?, *Applied Optics*, vol. **27**, **1988**, p. 1278.
- [30] COIRET A., DELANNE Y., *Mesure dynamique sans contact des hauteurs d'eau sur chaussées pour l'estimation de l'adhérence mobilisable*, Rapport technique, programme Predit2, sujet APTP, **2002**, 46 p.
- [31] MEYER W.E., HEGMON R., GILLESPIE T., Locked-Wheel Pavement Skid Tester Correlation and Calibration Techniques, *NCHRP report*, **151**, **1974**.
- [32] COMFORT G., *Investigation of Friction Standards for Wet Runway Pavements*, Fleet Technology Ltd. Report **4793** submitted to the Aerodrome Safety Branch of Transport Canada, **1998**.

