

## Chaussées et nids-de-poule : explications

Robert P. Chapuis, Zahia Makkeb

*Département CGM, Polytechnique Montréal, Montréal (Québec), Canada*

Djaouida Chenaf

*Département de génie civil, RMC, Kingston (Ontario), Canada*

### RÉSUMÉ

Tous les paliers de gouvernement qui financent la construction et la restauration des chaussées font face au problème de leur dégradation et en particulier des nids-de-poule. On impute la dégradation au vieillissement des chaussées, aux effets du gel et du dégel, et aux charges de trafic. Les nids-de-poule ont déjà été expliqués par des raisons qualitatives. L'article explique la série des mécanismes précurseurs du nid-de-poule et les quantifie. Les explications sont illustrées par des figures et photos. Elles incluent la ségrégation au placement des granulats, l'érosion interne sous sollicitation dynamique humide ou saturée, l'hétérogénéité des propriétés qui en résulte, le comportement différentiel au moment du gel, et les contraintes mécaniques qui conduisent à la création d'un nid-de-poule.

### ABSTRACT

All levels of government that finance the construction and restoration of roadways face the problem of their degradation and in particular potholes. The deterioration is attributed to the roadway aging, frost effects, thaw and traffic loads. The previous explanations for potholes were only qualitative. The article explains the series of pothole precursor mechanisms and quantifies them. The explanations are illustrated by figures and photos. They include segregation in the placement of aggregates, internal erosion under dynamic wet or saturated stress, the heterogeneity of the resulting properties, the differential behaviour at the time of freezing, and the mechanical stresses, which lead to the creation of a pothole.

### 1 INTRODUCTION

Plusieurs paliers de gouvernement payent la construction et la restauration des chaussées. Un problème récurrent est celui de leur dégradation, en particulier des nids-de-poule. Beaucoup d'usagers de la route se plaignent des dégâts que les nids-de-poule causent à leurs véhicules.

L'American Society for Civil Engineers a estimé que le mauvais état des chaussées aux États-Unis coûtait 67 milliards \$ US aux propriétaires de véhicules (réparation et entretien), soit 324\$ US par véhicule et par an (ASCE 2013). En Inde, selon les rapports de police, les nids-de-poule ont provoqué plus de dix mille accidents par an dans les dernières années (Yadav et al. 2019)

Les nids-de-poule, de formes diverses, se creusent graduellement avec le trafic routier. Au départ, la surface de béton bitumineux (BB) se fissure puis se dégrade par plus de fissures et arrachement de fragments par le trafic. Le dommage se propage en surface et en profondeur. Deux éléments sont toujours invoqués lors de la formation du nid-de-poule : (1) les sollicitations (poids, charges, chocs etc.) du trafic et (2) la présence d'eau.

Les études des nids-de-poule ont surtout examiné leur détection et leur réparation. On pense souvent que le nid-de-poule ne grandirait pas si l'on réparait rapidement le dommage initial du BB sitôt détecté (Marasteanu 2018).

On croit souvent qu'il faut du gel et du dégel pour avoir un nid-de-poule (APWA 2015). Par exemple, au Canada, les nids-de-poule apparaissent au début de l'hiver pour

certain, mais à la fin de l'hiver ou au début du printemps pour la plupart. Ils peuvent apparaître aussi au milieu de l'hiver s'il se produit un dégel pendant quelques jours. Cette croyance qui associe nid-de-poule et gel - dégel est erronée. Des nids-de-poule se forment dans des régions qui ne connaissent pas le gel (CSIR 2010). Le gel et le dégel ne sont pas des conditions nécessaires mais des conditions suffisantes et aggravantes.

Pour la formation des nids-de-poule, il existe donc des croyances erronées (comme on vient de le voir), et des explications qualitatives. Elles subdivisent la formation en 3, 4 ou 5 étapes.

On constate donc que la recherche est abondante sur la détection et la réparation, mais reste qualitative sur les processus de formation. Il semble pourtant qu'une bonne compréhension de la formation serait essentielle pour faire un bon diagnostic et une bonne réparation.

Cet article propose une approche quantitative pour expliquer la formation des nids-de-poule. Dans la section 2, l'article présente les explications usuelles proposées, et démontre que celles-ci sont insuffisantes d'une part et contredites par des observations d'autre part. Certaines de ces explications qualitatives sont conservées et, peut-être pour la première fois, documentées dans le chapitre suivant. On examine en particulier l'hétérogénéité des matériaux granulaires de chaussée. Des exemples de matériaux 0-20 mm, avant construction d'une part et avant réparation d'autre part, montrent que ces matériaux font beaucoup de ségrégation au transport et à la mise en

place, et ensuite sous les sollicitations du trafic. Leur instabilité interne en fait aussi des matériaux dégradés et hétérogènes par vibrations et infiltration d'eau (Chapuis et al. 1996; Chapuis et Saucier 2020). L'hétérogénéité initiale est amplifiée par les sollicitations du trafic et les infiltrations d'eau sous le BB. L'article propose alors une explication quantifiée de la formation des nids-de-poule. Finalement, l'article discute de la nécessité de choisir des matériaux plus stables, et de la nécessité de faire un meilleur diagnostic de la dégradation avant de la réparer.

## 2 EXPLICATIONS USUELLES

La création et le développement d'un nid-de-poule sont expliqués dans de nombreux documents, qui considèrent 3, 4 ou 5 étapes. Nous retenons ici le mécanisme en cinq étapes : (1) fissuration du béton bitumineux ; (2) infiltration d'eau ; (3) gel de l'eau et des sols avec expansion verticale ; (4) dégel de l'eau et des sols avec tassement ; et (5) endommagement par le trafic routier.



Figure 1. Quatre nids-de-poule réparés dans une zone fortement fissurée autour d'une fissure transversale avec de nombreuses fissures secondaires.

Quatre nids-de-poule réparés (Fig. 1), illustrent l'explication en cinq étapes. Les nids sont alignés sur une fissure transversale de bord en bord, avec de nombreuses fissures secondaires. L'étape (1) est satisfaite. On peut supposer que les étapes (2), (3) et (4) se sont produites. On est assuré que l'étape (5) s'est produite. Finalement, on dispose d'une explication qualitative, mais sans une

identification correcte des problèmes, comment faire un bon diagnostic ?

Initialement, on aurait donc une fissuration du béton bitumineux (BB). Celle-ci peut prendre diverses formes : fissure longitudinale, transversale, réfléchie (fréquente avec les chaussées rigides), fissure de bord, fissures de fatigue (faïençage). La formation et l'agrandissement de ces fissures ont rarement été quantifiés. Une exception est un article de Chapuis et Gatien (1995) pour la formation et la croissance des fissures transversales qui sont dues essentiellement aux contraintes thermiques.

L'explication usuelle en cinq étapes est contredite par de nombreuses observations. La première contradiction est que l'on n'a pas besoin des étapes (3) et (4) de gel et dégel pour avoir des nids-de-poule. De nombreuses régions qui ne connaissent jamais de gel ont des nids-de-poule dans leurs chaussées (e.g., CSIR 2010).

La 2<sup>e</sup> contradiction est qu'on trouve des nids-de-poule qui ne sont connectés à aucune fissure. Les Figures 2 et 3, prises à Montréal, le confirment.



Figure 2. Exemple de plusieurs nids-de-poule dans une zone fortement fissurée. Celui de gauche au centre qui est encerclé n'est relié à aucune fissure du BB.



Figure 3. Nids-de-poule pendant l'hiver à Montréal. Celui du centre, encerclé, n'est connecté à aucune fissure.

Dans la Figure 2 (à gauche et à mi-hauteur) et dans la Figure 3 au centre, on voit un nid-de-poule presque circulaire, qui n'est pas connecté à une fissure. De plus, il retient l'eau (Fig. 3) parce que son fond est formé de sol gelé, presque saturé, imperméable, qui est capable de retenir de l'eau salée (une forte conductivité a été mesurée dans la flaque) par les sels de déglacage.

La 3<sup>e</sup> contradiction est qu'un secteur de chaussée peut avoir des nids-de-poule sur une longueur de 10 à 30 m alors que les secteurs voisins n'en ont pas. Et pourtant, les conditions de sol naturel (subgrade), la structure de la chaussée, et les conditions climatiques sont identiques selon les études géotechniques et les rapports de construction. L'explication usuelle en cinq étapes ne peut pas expliquer la différence de comportement au gel – dégel entre des secteurs adjacents distants de 10 à 30 m.

Suite à l'examen de l'explication usuelle en cinq étapes, on conclut que cette explication est qualitative, incomplète et contredite par de nombreuses observations. Examinons maintenant les rares explications quantitatives proposées en lien avec la formation des nids-de-poule.

## 2.1 Mécanismes invoqués et quantifiés, gel - dégel

Au Canada, les chaussées restent gelées de plusieurs semaines à plusieurs mois chaque hiver. Les matériaux de fondation de chaussée et le sol naturel sous-jacent (les "matériaux") contiennent de l'eau dite interstitielle dans leurs pores. Cette eau occupe une fraction (%) de volume égale au produit de la porosité  $n$  par le degré de saturation  $S_r$ , qui définit la teneur en eau volumique  $\theta$ , soit  $\theta = nS_r$ . L'eau qui se change en glace augmente son volume d'environ 9%. Un matériau qui contient de l'eau, et qui gèle, voit son volume augmenter d'un pourcentage qui dépend du matériau, à savoir s'il est gélif ou non gélif, et de la valeur de  $S_r$  avant le gel.

Premier cas : le matériau est non gélif. Son eau augmente de volume mais ses solides se contractent légèrement à cause du froid. La petite contraction des solides est négligée devant la dilatation de l'eau. Dans une situation où  $S_r$  ne dépasse pas 50%, l'eau se dilate dans les pores sans perturber de façon significative la géométrie des pores. Par conséquent le volume  $V$  du matériau non gélif augmente d'un volume  $dV$  négligeable.

Si le matériau non gélif est dans un état où  $S_r > 85\%$  environ pour un sable ou une pierre concassée, avec des petites bulles d'air (phase gazeuse discontinue), l'augmentation de volume  $dV$  atteint au maximum :

$$dV/V \approx 1.09 n S_r \quad [1]$$

La dilatation étant gênée dans le plan horizontal, elle se produit en soulèvement. Par conséquent, l'Équation 1 donne le soulèvement maximal d'un matériau non gélif à haut degré de saturation en eau pendant le gel.

Considérons des blocs de 30 cm par 30 cm par 20 cm de hauteur. On se limite ici à la pierre 0-20 mm, appelée MG-20 au Québec (BNQ 2014). Supposons que le MG-20 sous le BB ait fait de la ségrégation pendant sa pose et son compactage, ce que l'on constate habituellement sur les chantiers. Selon les mesures au chantier des conditions de compactage, la teneur en eau massique  $w$  est de

4% dans un bloc et de 8.5% dans le bloc voisin. Le bloc le plus sec correspond au MG-20 minimum, avec 2% de fines et  $d_{10} = 0.7$  mm. Le bloc plus humide correspond au MG-20 maximum, avec 7% de fines et  $d_{10} = 0.13$  mm. La masse volumique sèche est de 2175 kg/m<sup>3</sup> dans le bloc sec et 2225 kg/m<sup>3</sup> dans le bloc humide. Avec une densité des solides de 2.7, on trouve que la porosité,  $n$ , du bloc est de 0.194 alors celle du bloc plus humide vaut 0.176. Supposons que la chaussée soit à Montréal. Avec le temps, l'eau mouillera le MG-20 par capillarité, en suivant toutes sortes de cheminements. Le bloc plus humide comme le bloc plus sec peuvent gagner de l'eau interstitielle. Le premier gel survient après un automne pluvieux, Compte tenu des valeurs vues précédemment, on peut estimer la valeur du degré de saturation  $S_r$  dans les deux blocs adjacents si l'on connaît la valeur de la succion  $u$  dans le matériau 0-20 mm. Pour cela on utilise les équations de Chapuis et al. (2015). Par exemple si la succion est de -3 à -4 kPa, le degré de saturation est de 22 à 34% dans le matériau initialement plus sec, alors que le matériau initialement plus humide est devenu saturé par capillarité. Au moment du gel, le bloc sec ne se soulève pas alors que le bloc humide se soulève (gonfle) d'au plus 3.8 cm selon l'Éq. 1. Il en résulte une irrégularité dans la surface du BB, et cette irrégularité, suite aux chocs du trafic, va endommager le BB, créer des dommages et ensuite un nid-de-poule.

Second cas : le matériau est gélif. La ségrégation de l'eau et la formation de lentilles de glace causent la majeure partie du soulèvement vertical. Dans un sol gélif qui gèle, la zone située au front de gel se dilate, ce qui attire l'eau vers le haut par capillarité. En migrant vers le front de gel l'eau forme des lentilles ou couches de glace, qui augmentent de façon importante la teneur en eau du sol gelé par rapport à celle du sol non gelé. Le sol gelé devient stratifié avec des couches de sol et de couches de glace transparente (Taber 1930). L'augmentation de volume  $dV$  et la dilatation verticale peuvent alors excéder le maximum donné par l'Éq. 1 pour un sol non gélif.

Que les matériaux de chaussées soient gélifs ou pas, il ne faut pas oublier que le soulèvement du BB inclut le soulèvement du sol de fondations, sous les matériaux de chaussée. Par exemple, dans l'ancienne allée de garage du premier auteur, le soulèvement causé par le gel (mesuré avec un niveau) atteignait 15 cm maximum.

Les conditions définissant les sols gélifs sont assez bien connues, souvent utilisées comme règles empiriques (Casagrande 1931; Yong and Warkentin 1966), mais aussi critiquées et nuancées (Johnson et al. 1974; Johnston et al. 1981).

Si de l'eau pénètre dans les matériaux de chaussée, y reste par capillarité et gèle, le gel fait gonfler le matériau et soulève le BB. La surface du BB peut devenir irrégulière, bosselée. Des fissures apparaissent et augmentent en nombre avec le trafic, ce qui crée le nid-de-poule.

## 2.2 Mécanismes invoqués et quantifiés, pas de gel

Dans les manuels routiers des pays sans gel, on explique qualitativement la création du nid-de-poule par les charges du trafic et les problèmes de drainage. Pour les

nids-de-poule dans les régions où il n'y a pas de gel, on peut expliquer la formation en quatre étapes.

L'étape 1 est une dégradation locale du BB. Celle-ci peut être une fissure, une perforation lors d'un accident, ou une usure excessive localisée, liée à un défaut d'épaisseur ou à une mauvaise qualité locale du BB, que ce soit une mauvaise qualité des agrégats ou du bitume.

L'étape 2 est une infiltration d'air par le BB qui est endommagé. Cette infiltration produit divers processus d'oxydation du bitume. Il en résulte plus de dommages. Le BB devient plus cassant, plus fragile (il se déforme moins lors des changements de température). Il en résulte une accélération de la fissuration.

L'étape 3 est l'arrachement de morceaux de BB par le trafic, qui creuse une dépression de quelques centimètres, ce qui expose les granulats sous-jacents. Ceux-ci subissent alors directement les forces du trafic, amplifiées par le choc causé par la dépression.

L'étape 4 est le creusement des granulats, qui donne le nid-de-poule tant dommageable pour les véhicules. À l'étape 3, les véhicules endommagent la chaussée tandis qu'à l'étape 4 le nid-de-poule endommage les véhicules.

On ne trouve pas de quantification de ces mécanismes dans la littérature disponible.

### 2.3 Bilan des observations et questions

On a vu auparavant que les explications proposées pour expliquer les nids-de-poule sont qualitatives, incomplètes et contredites par de nombreuses observations. On vient de voir que les rares explications quantitatives proposées sont en fait peu quantifiées.

Par exemple, ces explications ne permettent pas de comprendre le nid-de-poule de la Figure 4, formé autour d'un tuyau qui traverse la chaussée verticalement. Il n'est pas connecté à une fissure. On peut se demander pourquoi le nid-de-poule est apparu à cet endroit ? Quelles conditions ont pu causer sa formation ?

On peut retenir que trois points semblent confirmés par les observations :

- (1) la formation du nid-de-poule se déroule en plusieurs étapes,
- (2) le gel et le dégel ne sont pas nécessaires, et
- (3) l'eau n'est même pas nécessaire dans le cas des régions arides.

Par ailleurs, les explications usuelles ne soulignent pas un aspect commun à toutes les observations, à savoir qu'il faut des différences localisées (distances de 20 à 50 cm) dans les propriétés du BB et des matériaux de chaussée. Le maître mot ici est l'hétérogénéité.

Les Figures 2 à 4 illustrent trois cas de dommages et trois types d'hétérogénéité. Dans la Figure 2, la chaussée est très endommagée sur quelques mètres carrés, alors que dans le haut, à droite, elle ne l'est pas du tout. Il s'agit d'une hétérogénéité à l'échelle de quelques mètres. Dans la Figure 3, on observe, à l'intérieur d'un mètre de distance, deux nids-de-poule connectés à des fissures, et un nid-de-poule qui n'est pas connecté à une fissure. Il s'agit d'une hétérogénéité à l'échelle du mètre. Dans la Figure 4, le nid-de-poule est centré sur un tuyau vertical. L'hétérogénéité vient du tuyau et elle prend plusieurs formes. Il y a une première hétérogénéité de module

élastique : sous l'influence des charges du trafic, la chaussée se déforme plus que le tuyau d'acier, qui se comporte en point dur. Il y a une deuxième hétérogénéité dans la qualité du remblai le long du tuyau, quel que soit le soin qu'on y ait mis. Il y a une troisième hétérogénéité des propriétés mécaniques et hydrauliques des matériaux de chaussée à cause des vibrations que le tuyau peut transmettre au remblai adjacent. Avec le nid-de-poule on constate seulement le résultat final, c'est-à-dire un trou d'une vingtaine de centimètres de rayon autour du tuyau. Les seules fissures visibles sont celles d'instabilités locales à la périphérie du trou. Il n'y a pas de fissure connectée radialement, qu'on pourrait considérer comme le point de départ de la formation du nid-de-poule.



Figure 4. Nid-de-poule en cratère formé autour d'un tuyau vertical.

Dans la section 3, on illustre et quantifie des hétérogénéités. Celles-ci ont été constatées soit pendant la construction, soit avant de réparer une vieille chaussée endommagée. Il semble qu'avant cet article, de tels problèmes d'hétérogénéité n'avaient pas été investigués.

### 3 QUANTIFICATION DES HÉTÉROGÉNÉITÉS

On peut tirer des informations du contrôle de la qualité effectué au chantier. Dans cet article, nous les analysons pour illustrer, tout d'abord, la variabilité des matériaux utilisés (section 3.1). On se limite ici à la pierre 0-20mm,

Après avoir illustré cette variabilité au chantier, on examine quelques conséquences des formes des courbes granulométriques, en particulier les problèmes d'érosion interne dans la section 3.2. C'est ensuite dans la section 4 que l'on propose un mécanisme détaillé pour la formation des nids-de-poule dans les régions soumises au gel – dégel d'une part, et dans les régions qui ne connaissent pas de gel d'autre part.

### 3.1 Variabilité des matériaux au chantier

Les exemples qui suivent sont tirés de divers rapports contenant de nombreuses analyses granulométriques et autres essais (teneur en eau, masse volumique sèche) réalisés sur des pierres concassées 0-20 mm.

La première analyse concerne le pourcentage de solides passant le tamis de 0.080 mm (les fines), dans des échantillons prélevés après compactage et analysés. Pour le projet, le devis spécifiait que la pierre 0-20 mm devait avoir de 2 à 7% de fines, mais ne précisait pas si cette plage de 2 à 7% était avant ou après compactage. Les résultats de la Fig. 5 sont ceux après compactage. Leur analyse montre que 62% des spécimens avaient plus de 7% de fines et 8% des spécimens avaient moins de 2% de fines (Fig. 5). La moyenne en fines après compactage était de 8.2%, avec une grande dispersion des valeurs.

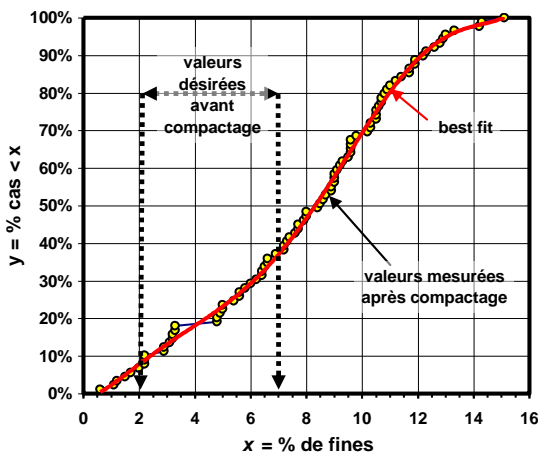


Figure 5. Distribution du % de fines d'une pierre 0-20 mm sur un chantier de construction. Noter les valeurs élevées et la grande dispersion des valeurs après compactage.

La deuxième analyse, pour le même projet, est celle de la teneur en eau au moment du compactage (Fig. 6). Celle-ci est irrégulière et dispersée. Elle résulte statistiquement de quatre familles dites normales, selon la méthode de décomposition modale d'une distribution (Chapuis et al. 2014; Chapuis 2016).

Il faut donc plusieurs mécanismes pour expliquer la dispersion. Un d'entre eux est assurément la variation du % de fines et la corrélation connue entre % de fines et rétention capillaire de l'eau entre les fines particules.

La troisième analyse est celle de la granulométrie du 0-20 mm sous le BB d'une chaussée ayant besoin de réparations. L'échantillonnage a donc été réalisé plusieurs années après la construction. Pour ce projet, on trouve une grande dispersion granulométrique (Fig. 7),

On a des échantillons sous le fuseau du MG-20, et d'autres au-dessus (Fig. 7). Cette ségrégation extrême peut apparaître en été, dès la construction, si le matériau est très sec. Il en résulte une grande hétérogénéité granulométrique, accompagnée d'une hétérogénéité dans la capacité à retenir de l'eau par capillarité. Les données de la Figure 7 illustrent cette hétérogénéité du MG-20 sous une vieille chaussée. Par ailleurs, à cause des

zones de faibles pentes des courbes granulométriques, on peut dire qu'il y aura érosion interne.

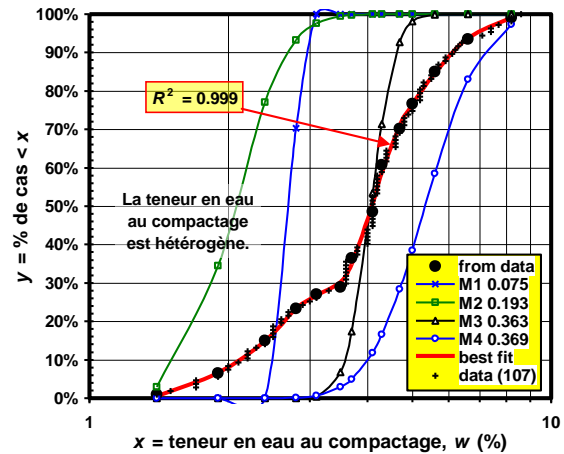


Figure 6. Distribution de la teneur eau massique (w %) mesurée pendant le compactage. Noter la dispersion des valeurs en quatre familles statistiques.

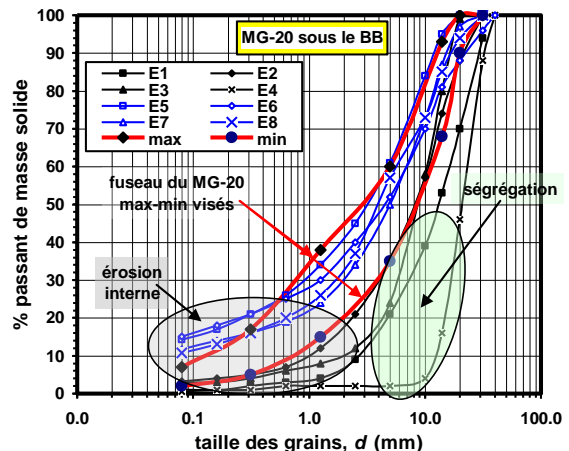


Figure 7. Quelques granulométries du 0-20 mm prélevé sous le béton bitumineux d'une chaussée à réparer.

### 3.2 Matériaux susceptibles d'érosion interne

Les granulométries de la Figure 7 sont typiques des cas d'érosion interne (Chapuis et al. 1996). L'évaluation des risques d'érosion interne ou suffosion se fait habituellement de la façon suivante : (1) on divise la granulométrie en deux parties, une partie dite fine et une partie dite grossière ; (2) on vérifie si les deux parties vérifient la loi des filtres comme si ces deux parties étaient adjacentes. La méthode est longue et laborieuse, même avec un chiffrier. Pour réduire la longueur de la vérification, Chapuis (1992) a utilisé les mathématiques pour exprimer les inégalités de pente sur la courbe granulométrique (GSD) de  $y = \%$  passant de la masse des solides versus  $x = \log(d / 1 \text{ mm})$ . Ces critères, rapides à vérifier, ont été améliorés par Chapuis et Tournier (2006).

La méthode de Kezdi (1969) se simplifie ainsi : si une partie de la GSD a une pente inférieure à 24.9% par cycle

log, le sol ne peut pas retenir les solides plus petits que la taille à laquelle cette condition se produit (Chapuis 1992). La méthode de Sherard (1979) devient : si une partie de la GSD a une pente inférieure à 21.5% par cycle log, le sol ne peut pas retenir les solides plus petits que la taille à laquelle cette condition se produit (Chapuis 1992).

La méthode de Kenney and Lau (1985), basée sur les travaux de Lubochkov (1965), fonctionne de la façon suivante : sur la GSD on choisit un point d'abscisse  $d_x$  et d'ordonnée  $y_x$ . En ce point, la pente de la GSD doit être plus grande que celle de la courbe de l'Équation 2 :

$$y / y_x = (d / d_x)^{0.7213} \quad [2]$$

En pratique, tous les critères d'érosion interne signifient que la GSD ne doit avoir de zone aplatie si l'on veut éviter l'érosion interne. En appliquant ces critères aux limites au fuseau du matériau 0-20 mm, on obtient que les particules inférieures à 0.3 mm sont mobiles pour le MG-20 minimum et que les particules inférieures à 1.3 mm sont mobiles pour le MG-20 maximum (Fig. 8).

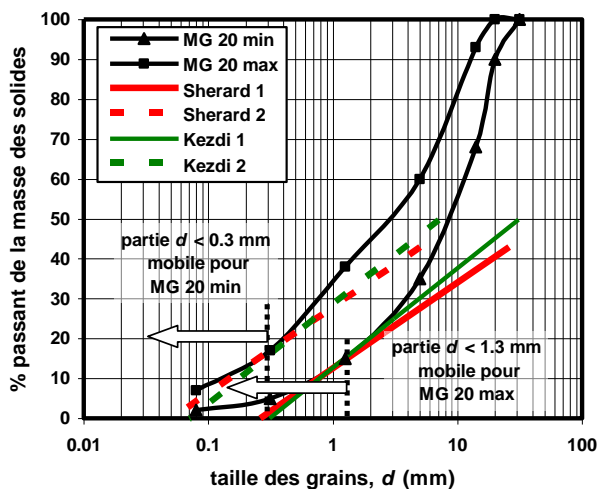


Figure 8. Fuseaux granulométriques des matériaux 0-20 mm et 0-56 mm (BNQ 2014). La majorité des matériaux compris dans ces fuseaux font de l'érosion interne.

La longueur de cet article étant limitée, on ne présente pas ici les résultats pour des matériaux 0-56 mm. Ceux-ci sont, eux aussi, susceptibles d'érosion interne.

### 3.3 Résultats de la ségrégation et de l'érosion interne

Les matériaux routiers usuels sont très hétérogènes une fois mis en place. Il y a une hétérogénéité initiale liée au déchargement, à la manipulation et au compactage. Il y a ensuite une hétérogénéité liée aux forces et vibrations du trafic, qui peut se produire parce que le matériau a une granulométrie susceptible d'érosion interne. Il y a aussi une hétérogénéité liée aux écoulements d'eau lorsque l'eau peut s'infiltrer à travers le BB pour circuler dans les matériaux sous-jacents. Ce problème d'hétérogénéité, qui empire avec le temps, est la source de nombreux problèmes de dégradation de la chaussée.

## 4 MÉCANISME DÉTAILLÉ PROPOSÉ

Le premier objectif de l'article était de montrer que les explications usuelles des nids-de-poule sont qualitatives et contredites sur divers points par des observations. Suite à nos observations et surtout à leur quantification, on peut alors atteindre l'objectif principal de proposer des mécanismes détaillés et quantifiables pour expliquer la formation des nids-de-poule.

### 4.1 Détails des mécanismes en cas de gel et dégel

Suite aux observations accumulées, et à la quantification des hétérogénéités des matériaux routiers, les mécanismes conduisant à un nid-de-poule dans une région avec gel et dégel sont ceux des étapes suivantes :

(1) L'hétérogénéité des matériaux au placement, et suite aux vibrations du trafic, cause une migration et des accumulations localisées des petits solides mobiles. La surface spécifique du matériau peut alors varier sur de courtes distances (Chapuis et Légaré 1992). Certaines zones retiennent beaucoup plus d'eau par capillarité que la zone ayant une granulométrie moyenne. Il en résulte des hétérogénéités mécaniques, hydrauliques et thermiques très défavorables pour la chaussée et le BB.

(2) Après un certain degré de ségrégation due à la pose initiale et au trafic ultérieur, plus quelques cycles de gel et dégel, le BB se tasse et se soulève, à cause des hétérogénéités sous-jacentes. Il subit des dommages, pas seulement suite aux hétérogénéités, mais aussi à cause d'autres efforts simultanés et selon ses qualités propres. Par exemple, à Montréal, la contraction thermique du BB fait apparaître des espaces vides ou décollements de 1 à 3 cm le long des trottoirs.

(3) Tout dommage du BB favorise la circulation de l'air dans les matériaux sous-jacents ainsi que l'infiltration de l'eau atmosphérique. L'air durcit et fragilise le BB alors que l'eau infiltrée peut stagner dans les zones enrichies en particules fines accumulées, ou circuler, ce qui amplifie les hétérogénéités par érosion interne.

(4) En période de gel, les zones enrichies en particules fines se soulèvent et créent des points durs pour le trafic, points qui concentrent les forces et causent encore plus de dommage localisé au BB. Si suffisamment de morceaux de BB sont arrachés par le trafic, le nid-de-poule se forme dans le BB. Mais le matériau sous-jacent peut rester gelé et résister aux chocs du trafic.

(5) En période de dégel, les zones appauvries en particules fines dégèlent bien plus vite que les zones enrichies en particules fines et saturées en glace, ce qui accentue le contraste des propriétés mécaniques et le contraste des points durs. Le trafic peut alors causer encore plus de dommage. Si suffisamment de morceaux de BB ont été arrachés par le trafic, et que les matériaux saturés en glace ont dégèlé, le nid-de-poule s'agrandit.

Finalement, les mécanismes sont relativement complexes. Les effets du trafic se manifestent à toutes les étapes conduisant à la formation des nids-de-poule.

Cependant, le trafic peut avoir un rôle minime comme dans l'exemple suivant. On examine une entrée privée de garage, en pente de 5%, avec faible circulation d'automobiles uniquement. Une fissure transversale majeure est

apparue au gel dans le bas de la pente. Cette fissure correspondait non pas à un creux mais à un soulèvement localisé du BB. Celui-ci, de 10 cm au maximum, a produit des fissures secondaires et il a même brisé le béton de la bordure (Fig. 9). Pourquoi ? Des fines du matériau 0-20 mm ont migré et se sont accumulées au bas de la pente. Saturées en eau par capillarité, elles ont gonflé au gel, ce qui a soulevé le BB et produit la fissure transversale initiale. La faible circulation automobile a endommagé la bosse fissurée, et le nid-de-poule se forme (Fig. 9).

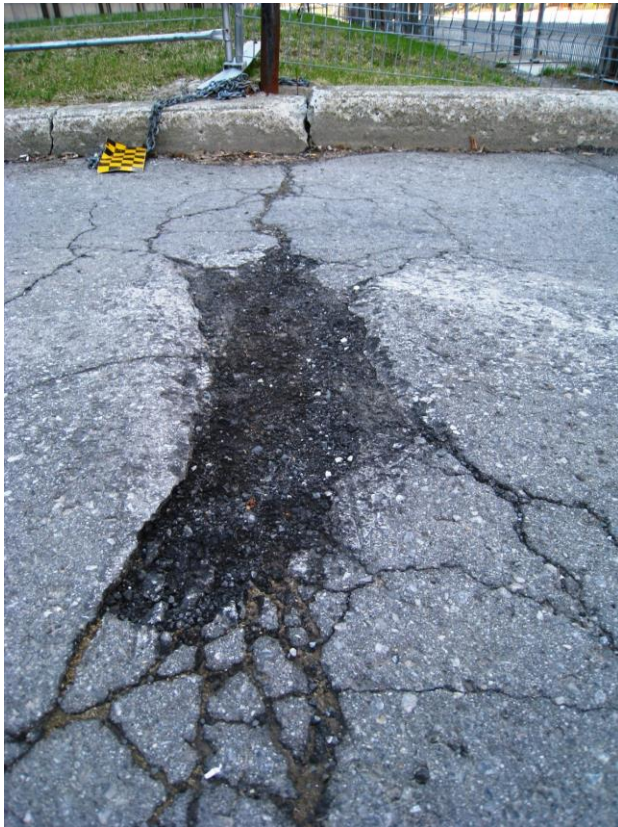


Figure 9. Fissuration et nid-de-poule dans une allée privée de garage, en pente de 5% environ. Photo prise vers la fin de l'hiver.

#### 4.2 Détails des mécanismes en l'absence de gel

Si la région ne connaît pas le gel, les mécanismes qui conduisent à un nid-de-poule sont similaires à ceux d'une région avec gel et dégel :

- (1) L'étape 1 est identique.
- (2) L'étape 2 est semblable. Les hétérogénéités sous-jacentes au BB, ainsi que les efforts subis par le BB, peuvent l'endommager de différentes façons.
- (3) L'étape 3 est identique.
- (4) Le gel ne joue aucun rôle. Cependant, il y a des points durs et le BB est endommagé par le trafic.
- (5) Le dégel ne joue aucun rôle. Cependant les eaux infiltrées travaillent (étape 3), et les roues chutant dans un trou de BB endommagent les matériaux de chaussée sous-jacents, donc créent un nid-de-poule.

## 5 DISCUSSION

On pensait que deux éléments étaient omniprésents lors de la formation du nid-de-poule : (1) les poids, charges, chocs ... du trafic et (2) la présence d'eau. Cet article a montré qu'un 3<sup>e</sup> élément était essentiel : l'hétérogénéité des matériaux de chaussée. Les mécanismes de création du nid-de-poule sont complexes et interactifs.

Il faut d'abord un dommage du béton bitumineux. Les causes sont multiples. Une cause majeure ne semble pas avoir été quantifiée avant cet article. Il s'agit de l'hétérogénéité des matériaux de chaussée, qui sont hétérogènes dès leur placement. Les vibrations dues au trafic augmentent la ségrégation des particules fines. Elles créent des zones enrichies ainsi que des zones appauvries en particules fines. Il en résulte des hétérogénéités mécaniques, hydrauliques et thermiques. Celles-ci sont la cause de dommages localisés du BB. Une fois le BB abîmé, l'air et l'eau circulent plus facilement sous le BB et dans les matériaux sous-jacents. Comme ceux-ci sont susceptibles d'érosion interne (Chapuis et al. 1996) les hétérogénéités de départ sont amplifiées, ce qui accélère la détérioration de la chaussée et la création des nids-de-poule.

Un cas initial de dommage au BB, assez commun au Québec, est illustré par la Fig. 10.



Figure 10. Fissuration concentrée le long d'un trottoir.

Plusieurs ingénieurs et entrepreneurs aiment que le béton de ciment des dalles de trottoir soit coulé sur une pierre nette, par exemple du 10-25 mm ou du 5-20 mm. La pierre nette fait une belle surface de travail, qui favorise la pose des armatures d'acier et la coulée du béton de ciment. Cependant une pierre nette cause un problème d'hétérogénéité. La pierre nette sous le trottoir et la pierre 0-20 mm sous la chaussée sont adjacentes sans respecter la loi des filtres. Il en résulte que des particules du 0-20 mm, sous l'effet du trafic, migrent dans les pores de la pierre nette, ce qui produit, après quelques années, des affaissements et des fissurations localisées le long du trottoir.

## 6 CONCLUSION

Cet article a examiné les explications proposées à ce jour pour expliquer la formation des nids-de-poule dans les chaussées. Il a étudié aussi quelques fausses croyances associées aux nids-de-poule. Par exemple on associe les nids-de-poule aux cycles de gel et dégel. Pourtant, dans son analyse de l'hiver 1977-78, qui fût le pire hiver en termes de nids-de-poule au nord-est des États-unis, Hershfield (1979) a conclu que le pire hiver pour les nids-de-poule était celui qui avait eu le moins de cycles de gel et dégel au cours des 18 années précédentes. Par ailleurs, les nids-de-poule existent aussi dans les régions qui ne connaissent jamais de gel (CSIR 2010).

Il est clair que les nids-de-poule ont un impact économique important. On les a expliqué usuellement par des mécanismes simplistes et qualitatifs, contredits par de nombreuses observations. On ne les a pas quantifiés.

Cet article a identifié les mécanismes. Les points clés à retenir sont les suivants. Le point de départ est un endommagement local du BB, qui peut avoir diverses causes. Une cause majeure, identifiée et quantifiée dans l'article, est l'hétérogénéité des matériaux utilisés pour la chaussée. L'article l'a bien démontrée pour le 0-20 mm.

L'hétérogénéité, tant mécanique qu'hydraulique et thermiques, conduit à des concentrations de contraintes, une dégradation accentuée d'un dommage initial de BB, et son creusement par les charges et les chocs du trafic. Par ailleurs, l'air et l'eau qui peuvent circuler sous le BB et dans les matériaux sous-jacents contribuent à la dégradation, en particulier par l'érosion interne qui accroît l'hétérogénéité dans la distribution des solides et de l'eau.

On peut se demander pourquoi les organismes qui définissent les critères de conception des chaussées autorisent des matériaux 0-20 mm et 0-56 mm, ou leurs équivalents selon les pays, qui font de l'érosion interne. Les problèmes d'érosion interne, identifiés depuis 1996, n'auraient donc pas été suivis d'actions correctives.

## 7 REMERCIEMENTS

Cet article résulte d'une observation, pendant de nombreux hivers, des mécanismes qui dégradent les chaussées. Les explications de l'article résultent d'une activité de recherche personnelle qui n'a pas été subventionnée. Elles servent actuellement d'hypothèses de démarrage d'une recherche subventionnée qui n'a pas encore publié de résultats.

## 8 RÉFÉRENCES

APWA. 2015. *Pothole Fact Sheet*. American Public Works Association.

ASCE. 2013. *Report Card for America's Infrastructure*.

BNQ. 2014. Norme BNQ 2560-114-II. Fondation, sous-fondation, couche de roulement et accotement (granulats utilisés pour les chaussées).

Casagrande A. 1931. A new theory of frost heaving: Discussion. *Proc. Highway Res. Board* **11**: 168–172.

Chapuis RP. 1992. Similarity of internal stability criteria for granular soils. *Can. Geotech. J.* **29**: 711–713.

Chapuis RP. 2016. *Extracting information from grain size distribution curves*. Geotics Editions, Montréal, Can:

Chapuis RP, Gatién A. 1995. Temperature dependent tensile strength of asphalt mixtures in relation with field cracking data. *ASTM STP* **1265**: 180–193.

Chapuis RP, Légaré PP. 1992. A simple method for determining the surface area of fine aggregates and fillers in bituminous mixtures. *ASTM STP* **1147**: 177–186.

Chapuis RP, Saucier A. 2020. Assessing internal erosion with the modal decomposition method for grain size distribution curves. *Acta Geotech.*, **15**(6): 1595–1605.

Chapuis RP, Tournier JP. 2006. Simple graphical methods to assess the risk of internal erosion. *ICOLD Barcelona 2006, Question 86*, pp 319–335

Chapuis RP, Contant A, Baass K. 1996. Migration of fines in 0–20 mm crushed base during placement, compaction, and seepage under laboratory conditions. *Can Geotech J.* **33**(1): 168–176.

Chapuis RP, Dallaire V, Saucier A. 2014. Getting information from modal decomposition of grain size distribution curves. *Geotech. Testing J.* **37**(2): 282–295.

Chapuis RP, Masse I, Madinier B, Duhaime F. 2015. Water retention curves of coarse soils without organic matter: improved data for improved predictions. *Geotech. Test. J.* **38**(3): 325–337.

CSIR. 2010. Potholes: Technical guide to their causes, identification and repairs. CSIR Built Environment, South Africa.

Hershfield DM. 1979. Freeze-thaw cycles, potholes, and the winter of 1977-78. *Journal of Applied Meteorology* **18**: 1003–1007.

Johnson TC, Berg RL, Carey KI, Kaplar CW. 1974. Roadway design in seasonal frost areas. U.S. Army, CRREL, Tech, Report TR259, 104 p.

Johnston TH, Ladanyi B, Morgenstern NR, Penner E. 1981. Engineering characteristics of frozen and thawing soils. Chapter 3 in *Permafrost – Engineering Design and Construction*. ACGR, NRC, John Wiley & Sons Toronto, pp. 73–147.

Kenney TC, Lau D. 1985. Internal stability of granular filters. *Can. Geotech. J.* **22**: 215–225.

Lubochkov EA. 1965. Graphical and analytical methods for the determination of internal stability of filters consisting of non cohesive soil. *Izv vniig* **78**: 255–280.

Marasteanu M. 2018. Pothole prevention and innovative repair. *Minnesota Dept of Transportation Research Report* 2018-14, 129 p.

Taber, S. 1930. Freezing and thawing of soils as factors in the destruction of road pavements. *Public Roads* **11**: 113–132.

Yadav C, Shinde H, Sude S, Shinde P, Ganla S, Kulkarni S. 2019. Assessment of pothole using QGIS & AutoCAD software. *IRJET* **06**(4): 2701–2704.

Yong RN, Warkentin BP. 1966. Soil freezing and permafrost. Chapter 12 in *Introduction to Soil Behavior*. MacMillan, New York, pp. 391–428.