

# ETUDE DE L'IMPACT DE L'UTILISATION DE LAIT DE CHAUX POUR LE TRAITEMENT DU RESSUAGE SUR LES EAUX DE SURFACE

L. Friteyre, J.-M. Sigaud, D. Rebière, D. Bachellerie, C. Détruit, C. Barrailh, C. Franck-Néel, D. Goutaland & S. Moreira

Cerema, Agence de Clermont-Ferrand, France

[Laurent.Friteyre@cerema.fr](mailto:Laurent.Friteyre@cerema.fr)

P. Métails-Lagouarde & R. Chevalier,

LHOIST, France

[Pierre.Metails@lhoist.com](mailto:Pierre.Metails@lhoist.com)

## RÉSUMÉ

Dans un contexte de changement climatique, la succession de canicules peut accélérer la dégradation des enduits superficiels d'usure à cause du phénomène de ressuage, qui se matérialise par une remontée de bitume à la surface de la chaussée.

Une solution technique à coût modéré est l'épandage d'une suspension de lait de chaux. Cela permet de prévenir et de traiter efficacement le ressuage lors des périodes de fortes chaleurs, en évitant la ruine de la chaussée à court terme et en garantissant la sécurité des usagers lors de ces événements extrêmes. Avant de généraliser cette pratique, la question de l'impact environnemental de cette solution technique a été soulevée par les gestionnaires de ce type de chaussée.

Cette étude vise à évaluer l'impact de l'utilisation de lait de chaux pour le traitement du phénomène de ressuage sur les eaux superficielles. Dans un premier temps, une modélisation de l'entraînement de chaux par lessivage d'un impluvium routier modèle a simulé l'impact environnemental théorique sur l'eau. Une deuxième phase de l'étude a ensuite consisté en une analyse de suspensions de lait de chaux en laboratoire pour en déterminer les paramètres à surveiller dans le milieu naturel. Cette phase s'est poursuivie par une expérimentation sur un modèle réduit de chaussée, avec analyse des eaux de ruissellement lors de pluies de diverses intensités simulées avec différentes conditions d'applications du lait de chaux. Les analyses des eaux de lessivage de ce pilote expérimental ont permis d'identifier différents leviers de réduction d'éventuels impacts environnementaux : affinage des doses du produit à épandre, optimisation du temps de séchage et du nombre d'épandages. Dans une troisième phase, un suivi in situ sur trois ans de la qualité physico-chimique et hydrobiologique d'un cours d'eau proche d'une portion de route circulée, soumise au ressuage et à l'application de lait de chaux, a été mis en œuvre. Les résultats n'indiquent pas d'impact significatif du produit sur la qualité des eaux de surface analysées.

L'étude réalisée a ainsi permis de proposer un dosage minimal de suspension de lait de chaux qui garantit d'une part l'efficacité du traitement contre le ressuage et d'autre part une réduction du risque d'impact environnemental sur les eaux de surface situées à proximité des routes rurales.

## 1. INTRODUCTION

Le ressuage est un phénomène qui se produit généralement lors des périodes de fortes chaleurs, principalement sur les chaussées recouvertes par des revêtements minces de type Enduit Superficiel d'Usure (ESU). Un ESU est principalement constitué de couches de liant et de granulats répandues successivement [1]. Le bitume ressort de la couche mince pour revenir en surface. Ce phénomène est favorisé par les fortes chaleurs estivales et par le niveau de contraintes de circulation. Le bitume devenu visqueux voire liquide n'est plus en mesure d'assurer le maintien de la couche de surface et des gravillons qui la constituent. La remontée de bitume crée des zones lisses et glissantes au niveau des bandes de roulement de la chaussée. En cas de chaleurs extrêmes, le bitume s'enroule autour des pneumatiques des véhicules, créant des arrachements dit de peignage et de pelade, pouvant aller jusqu'à la disparition de la couche mince en différents points des bandes de roulement [2].

Le réseau routier rural français, majoritairement géré par les départements, est constitué essentiellement de chaussées de type ESU. Pour prévenir ou traiter le phénomène de ressuage, les gestionnaires de ces routes ont l'habitude de répandre des gravillons et/ou du sable sur la chaussée. D'autres techniques comme l'hydrodécapage peuvent être utilisées, mais seulement par quelques unités capables d'appliquer ce type de traitement. L'hydrodécapage n'est de plus utilisé que pour régénérer l'aspect de surface d'une chaussée ayant ressué, une fois l'épisode terminé, principalement pour lui redonner de l'adhérence. La reprise complète de la couche de roulement est la dernière solution technique possible, toutefois coûteuse, de maintenance après ressuage.

Une solution alternative, mise en œuvre en France par plusieurs départements, ainsi que dans d'autres pays comme les Etats-Unis [3], consiste à épandre une suspension de lait de chaux sur la chaussée avant ou pendant la période de ressuage. Ce mélange à base de chaux éteinte et d'eau accroît la résistance mécanique des ESU en interagissant avec le bitume [4,5]. L'épandage de lait de chaux évite ainsi le recours à des épandages de gravillons qui rendent la conduite beaucoup plus délicate, notamment pour les deux-roues. Il permet de conserver une adhérence au pendule SRT (Skid Resistance Tester) constante avant et après traitement. Il peut être mis en œuvre à tout moment et ne nécessite pas de signalisation particulière, apportant ainsi une réponse immédiate aux usagers. L'épandage de lait de chaux peut aussi être utilisé de façon préventive, dès l'annonce de fortes chaleurs. Les retours d'expériences montrent une efficacité d'une dizaine de jours, pour un trafic faible et en l'absence de précipitations.

En cas de précipitations, notamment de pluies d'orage accompagnant les fortes chaleurs estivales, le ruissellement sur les chaussées traitées au lait de chaux présente toutefois un risque d'impact environnemental sur les milieux aquatiques à proximité. Dans la mesure où l'application du lait de chaux est une pratique qui se généralise sur le réseau routier rural, il importe d'analyser ce risque d'impact environnemental.

L'objectif de cette étude est donc d'évaluer l'impact sur les eaux superficielles du traitement du ressuage des chaussées par épandage de lait de chaux, dans un contexte de changement climatique marqué par l'augmentation concomitante des occurrences de fortes chaleurs et de pluies estivales de forte intensité.

## 2. UNE APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE EN 3 PHASES

Le travail a été mené en combinant 3 phases d'études complémentaires, permettant de répondre de manière progressive à l'objectif :

1. Une phase d'analyse théorique (désignée phase 1 dans la suite de l'article), visant à modéliser le lessivage de la chaux par une pluie, dans le but d'améliorer la compréhension des facteurs de contrôle de la dynamique d'entraînement de la chaux et d'orienter les autres phases de l'étude ;
2. Une phase d'essais de laboratoire et sur modèle réduit de chaussée (désignée phase 2 dans la suite de l'article), cherchant à déterminer les facteurs contrôlant le lessivage effectif de la chaux sur une chaussée, en conditions contrôlées et maximisantes ;
3. Une phase de suivi pluriannuel *in situ* (désignée phase 3 dans la suite de l'article), visant à évaluer l'impact réel de l'application de lait de chaux sur la qualité de l'eau d'un tronçon d'un cours d'eau témoin bordant la route rurale étudiée.

### 2.1 Phase 1 : modélisation du lessivage d'une route traitée au lait de chaux

Cette phase de l'étude consiste en la mise en œuvre d'une approche théorique, s'appuyant sur une modélisation de l'entraînement de la chaux issu du lessivage d'un impluvium routier modèle considéré étanche et de caractéristiques géométriques définies (linéaire et largeur de voie, pente homogène), traité au préalable par un épandage homogène de lait de chaux.

L'objectif est de déterminer la concentration maximale en chaux éteinte (hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) dans l'eau pluviale issue du ruissellement sur une chaussée traitée au lait de chaux, pour un événement pluvieux.

La méthodologie mise en œuvre comprend les étapes consécutives suivantes :

- définition d'un hyétogramme de pluie synthétique de type « Chicago » [6], caractérisée par sa période de retour T et sa durée D ;
- calcul de l'hydrogramme associé à la pluie synthétique à l'exutoire de l'impluvium routier modèle par la méthode de l'hydrogramme unitaire ;
- calcul du flux massique de chaux entraînée par les eaux de ruissellement jusqu'à l'exutoire sur la base du modèle de mise en suspension et d'entraînement de particules solides de Bujon [7] ;
- calcul de l'évolution de la concentration en chaux à l'exutoire de l'impluvium routier modèle à partir de l'hydrogramme et des flux massiques, et estimation de la concentration maximale en chaux des rejets d'eaux de ruissellement.

Le *Tableau 1* synthétise les données d'entrée relatives à l'impluvium routier modèle considéré dans le cadre de l'étude, défini de façon à être représentatif du réseau routier rural français (chaussée bidirectionnelle à 2x1 voies). Cet impluvium modèle est considéré traité par un épandage homogène de lait de chaux.

*Tableau 1 - Caractéristiques de l'impluvium routier modèle considéré en phase 1*

Linéaire de voies L	500 m
Largeur de chaussée l	5,50 m
Pente de la chaussée p	1 %
Concentration en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en surface	20 g/m <sup>2</sup>

Pour la définition du hyétogramme de pluie synthétique de type « Chicago », il a été retenu une période de retour T = 2 ans et une durée D = 2 h, représentative d'une pluie d'orage couramment observée au droit du site étudié en phase 3 de l'étude. L'intensité moyenne de

l'événement pluvieux modélisé est de 14,3 mm/h (données d'entrée issues de la station météorologique Météo-France 63113001 de Clermont-Ferrand).

Concernant le modèle d'entraînement, il a été fait l'hypothèse que la chaux ne subissait pas de carbonatation et que les particules mobiles étaient entraînées instantanément par les eaux de ruissellement. La mise en suspension des particules de chaux mobilisées sous l'effet de la pluie suit une cinétique proportionnelle à la quantité disponible de chaux sur la chaussée et à l'intensité de la pluie.

Le modèle d'entraînement intègre également la prise en compte d'un coefficient  $K$  traduisant la proportion de particules de chaux entraînées par lessivage. Les modulations de ce coefficient de partage  $K$  peuvent s'apparentées à des variations de durée de séchage de la suspension de lait de chaux, avant la pluie. En effet, plus le temps de séchage est court, moins la chaux est fixée à la surface de la chaussée et plus la proportion de chaux entraînée par lessivage est élevée.

Les résultats de la première phase ont été exploités pour améliorer la compréhension de la dynamique d'entraînement de la chaux issu du lessivage d'un impluvium routier, et orienter les choix méthodologiques des phases 2 et 3.

## 2.2 Phase 2 : approche expérimentale d'évaluation de l'impact

### 2.2.1 Analyse préalable du lait de chaux en laboratoire

Le lait de chaux analysé se présente sous la forme d'une suspension de di-hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) en solution aqueuse à laquelle ont été ajoutés des additifs (tensioactifs...) et de classe CL90-S ML selon la norme NF EN459-1. Ces caractéristiques ont conduit à l'approche suivante :

- le produit étant une suspension, il ne peut être abordé comme un simple liquide et sa fraction solide non soluble doit être considérée en tant que facteur potentiellement impactant pour le milieu naturel (relargage de particules en suspension) ;
- le principe actif étant la chaux éteinte ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), le pH et l'alcalinité seront étudiés, ces deux paramètres étant très impactants sur l'eau en provoquant des déplacements d'équilibres (équilibres calco-carboniques par exemple) ou favorisant des espèces chimiques potentiellement toxiques pour le milieu naturel (eau, faune, flore) ;
- une caractérisation de la charge organique est réalisée du fait de la présence d'additifs inconnus (soumis au secret industriel) potentiellement d'origine organique et donc susceptibles d'impacter le milieu naturel récepteur (asphyxie).

Au regard des éléments abordés ci-dessus, le plan d'analyse ci-dessous a été réalisé en laboratoire pour diverses concentrations en produit commercial analysé :

- particules en suspension : Matières En Suspension (MES), turbidité ;
- basicité : pH ;
- alcalinité : TA (alcalinité composite titrable à pH 8,3) et/ou TAC (alcalinité totale) ;
- pollution organique : calcination à 550°C et Demande chimique en oxygène (DCO).

## 2.2.2 Approche expérimentale sur modèle réduit de chaussée

L'étude expérimentale s'est poursuivie par une analyse des eaux de ruissellement lors de simulations de pluie de diverses intensités, en conditions contrôlées.

Le modèle réduit de chaussée est constitué de plaques d'essais fondées sur un support en bois, d'une surface de 3,05 m<sup>2</sup> et d'une pente de 2,5% (valeur similaire à une pente latérale d'une chaussée comportant un profil en travers en toit). Ces plaques ont été revêtues d'un enduit superficiel. L'épandage du lait de chaux a été effectué à l'aide d'un pulvérisateur portatif.

Un système de génération de pluies artificielles a été utilisé pour simuler des événements pluvieux d'intensité et de durée contrôlées. L'eau pompée dans une cuve de stockage est injectée sous pression par un système de buses réparties sur des rampes tenues à un portique (*Photo 1*). La rampe est placée au-dessus des plaques d'essais à 3,5 m de hauteur environ, afin que la pluie soit la plus homogène possible à la surface des plaques, placées à environ 0,5 m de la surface du sol. La pression d'injection est modulable en fonction de l'intensité de pluie recherchée (de 14 mm/h à 221 mm/h).

Afin de prélever les eaux de lessivage, un dispositif de collecte a été mis en place en partie basse de chaque plaque d'essais. Toutes les eaux ruisselant sur la plaque sont collectées puis dirigées en dehors de la zone d'influence du système de génération de pluies, de sorte à réaliser des prélèvements successifs d'eaux de ruissellement, tout au long de la pluie artificielle générée.



*Photo 1 – Dispositif expérimental d'évaluation en conditions contrôlées de l'impact environnemental de l'épandage de lait de chaux (plaque d'essai positionnée sous le portique du système de génération de pluie artificielle)*

Deux campagnes d'essais ont été réalisées au cours des étés 2019 et 2020, sur une plaque d'essais spécifique à chaque campagne. Pour les 2 campagnes, les paramètres suivants sont restés fixes :

- pente de la plaque (2,5%),
- intensité et durée de la pluie (respectivement de 67 mm/h et de 20 min), correspondant à une pluie de période de retour 2 ans (données de la station météorologique Météo-France 63113001 de Clermont-Ferrand) ;
- macro-texture de l'enduit superficiel ;

- météorologie « externe » (vent, T° de l'air et de la plaque) la plus similaire possible pour l'ensemble des essais.

Le lait de chaux épandu dans le cadre de ces 2 campagnes d'essais a été préalablement étudié en laboratoire. Le *Tableau 2* synthétise l'ensemble des essais réalisés lors des deux campagnes de 2019 et 2020.

*Tableau 2 – Synthèse des essais réalisés lors des campagnes de 2019 et 2020*

	Essais	Date	Quantité de lait de chaux épandue (g/m <sup>2</sup> )	Temps de séchage (h)
2019	2019-Blanc	26/06/2019	0	1
	2019-E1	27/06/2019	20	1
	2019-E2	28/06/2019	30	1
2020	2020-Blanc	27/07/2020	0	1
	2020-E1	28/07/2020	30	1
	2020-E2	29/07/2020	30	1
	2020-E3	30/07/2020	30	1
	2020-E4	03/08/2020	30	60

Pour chaque campagne, les premiers essais sont des essais « blancs », c'est-à-dire sans épandage de lait de chaux, servant pour la suite de valeurs de référence de la qualité des eaux de lessivage « brutes » rejetées par la plaque d'essai.

Les essais suivants ont été réalisés sur des plaques d'essais préalablement traitées par épandage de 20 ou 30 g/m<sup>2</sup> de lait de chaux. Pour une même campagne, les essais étant réalisés successivement, une quantité de chaux résiduelle, correspondant à la chaux non lessivée des essais précédents, est déjà présente sur la plaque à partir du deuxième essai.

Le *Tableau 3* présente le plan expérimental avec les variables et les paramètres étudiés dans le cadre ces essais.

*Tableau 3 – Plan expérimental retenu pour l'évaluation en conditions expérimentales contrôlées de l'impact environnemental de l'épandage de lait de chaux*

Variables étudiées	Références d'essais comparés	Paramètres fixés
1- Quantité épandue	2019-E1 ; 2020-E1	Nombre d'épandage réalisés sur plaque (1), temps de séchage
2- Nombre d'épandages successifs	20020-E1 ; 2020-E2 ; 2020-E3	Plaque d'essai, quantité épandue, temps de séchage
3- Durée de séchage	2020-E3 ; 2020-E4	Plaque d'essai, quantité épandue

Les échantillons prélevés en cours d'essais ont fait l'objet d'analyses physico-chimiques. Les paramètres suivis ont été choisis en fonction des résultats des analyses préalables de la suspension de lait de chaux menées au laboratoire.

## 2.3 Phase 3 : méthode de suivi in situ de l'impact sur le milieu aquatique

### 2.3.1 Présentation du site d'étude

Le site d'étude, localisé sur la *Figure 1*, est un tronçon de 300 m de la Route Départementale 14 (RD14), située sur la commune de Montmorin dans le département du Puy-de-Dôme (France). Cette route rurale, revêtue d'un enduit superficiel d'usure, est soumise au phénomène de ressuage en période de fortes chaleurs.

Le tronçon étudié longe le ruisseau de l'étang des Maures, qui s'écoule en contrebas de la chaussée et reçoit les rejets en provenance de la RD14. Ce cours d'eau témoin étant situé dans une zone de tête de bassin versant, il est peu soumis à d'autres pressions anthropiques autres que celles associées à la route.

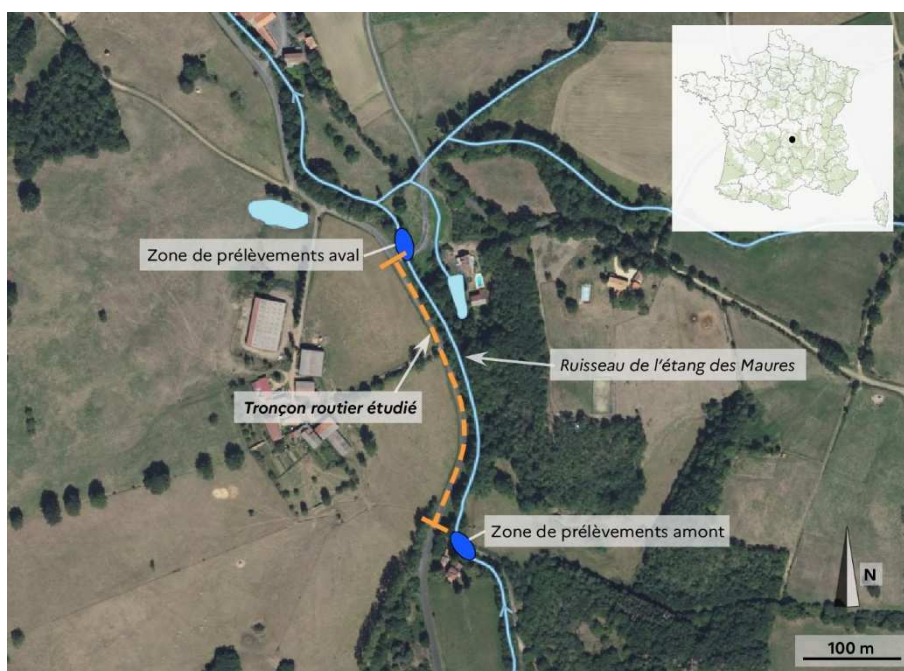


Figure 1 - Localisation du tronçon routier étudié et du cours d'eau témoin retenus en phase 3

### 2.3.2 Matériel et méthodes de suivi

Afin d'évaluer l'impact environnemental *in situ* de l'épandage de lait de chaux, un traitement du tronçon routier retenu a été réalisé, une fois par an pendant 3 ans (2019 à 2021). Les épandages de lait de chaux ont été réalisés en période estivale à l'aide d'un véhicule adapté (Photo 2).

Un double suivi physico-chimique et hydrobiologique a été réalisé, en amont et en aval de la zone d'épandage, sur le cours d'eau témoin (*Figure 1*). Ce suivi a consisté en la réalisation de deux campagnes annuelles de prélèvements, au printemps et à l'automne (respectivement avant et après la période d'épandage de lait de chaux).

Pour chacune des campagnes, les prélèvements pour analyses physico-chimiques et hydrobiologiques ont été effectués simultanément en prenant soin de commencer par le point situé en aval de la zone traitée au lait de chaux. Les paramètres analysés en laboratoire sont présentés dans le *Tableau 4*. Les résultats des analyses font l'objet, lorsque



cela est possible, d'une interprétation s'appuyant sur le guide technique relatif à l'évaluation de l'état des eaux de surface continentales [8].

*Tableau 4 – Altérations analysées avec paramètres de suivi associés*

Altérations	Paramètre(s) associé(s)
Particules en suspension	MES
Matières organiques et oxydables	DCO, taux de saturation en O <sub>2</sub>
Acidification	pH
Minéralisation	Conductivité, Ca, Mg, TA et TAC
Hydrobiologie	I2M2



*Photo 2 – Véhicule utilisé pour l'épandage de lait de chaux en 2020*

### 3. RESULTATS

#### 3.1 Dynamique d'entraînement théorique de la chaux issu du lessivage d'une route

La *Figure 2* représente l'évolution de la concentration en chaux hydratée à l'exutoire de l'impluvium routier modèle en fonction du coefficient  $K$ .

Selon la valeur donnée au coefficient  $K$ , une proportion plus ou moins importante de lessivage est calculée par le modèle. La *Figure 2* montre que la proportion simulée de particules de chaux entraînée varie entre 16 % ( $K = 0,5 \text{ s}^{-1}$ , représentatif d'un temps de séchage long) et 76 % ( $K = 4,0 \text{ s}^{-1}$ , représentatif d'un temps de séchage court). Pour un temps donné, les concentrations en chaux hydratée les plus élevées correspondent aux valeurs de  $K$  les plus fortes (*Figure 2*). Ainsi, plus la proportion de particules de chaux éteinte entraînée est élevée (i.e. plus la durée de séchage de la suspension de lait de chaux sur la chaussée avant une pluie est courte), plus les concentrations en chaux hydratée de l'eau à l'exutoire sont élevées.

On constate sur la *Figure 2* que le modèle proposé prévoit un pic de concentration en chaux à l'exutoire en début de pluie. Dans les conditions de modélisation, un déphasage de 15 min est constaté entre le pic du hétérogramme de pluie et le temps d'atteinte de la concentration maximale en chaux, quel que soit la valeur du coefficient  $K$ .



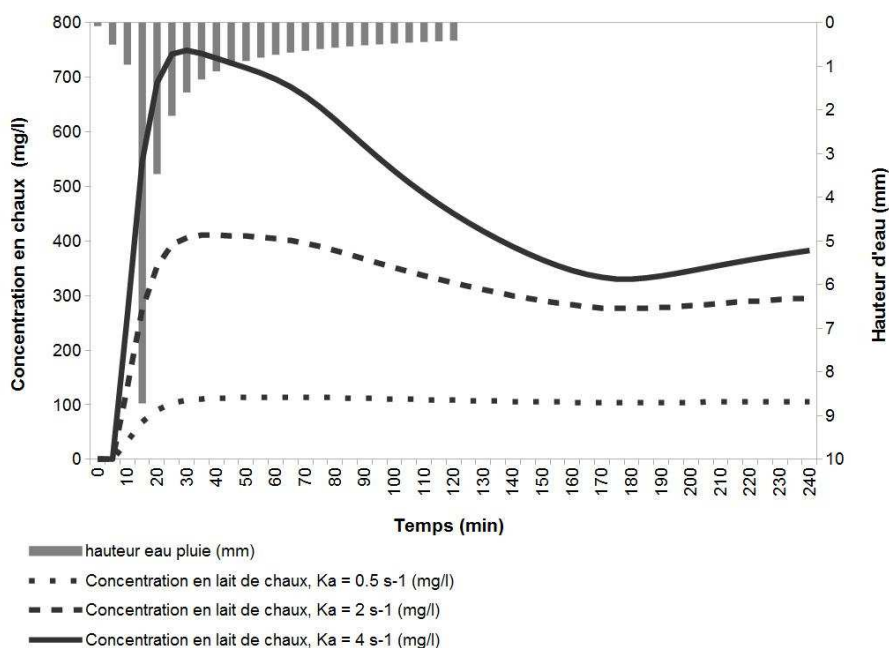


Figure 2 - Evolution de la concentration en chaux hydratée au droit de l'exutoire en fonction du coefficient K

Dans l'objectif d'évaluer l'impact environnemental du lait de chaux, il ressort de cette approche théorique l'importance de suivre les premiers flux d'eau à l'exutoire de l'impluvium routier, les plus concentrés en chaux. Par ailleurs, il importe de contrôler la durée de séchage de la chaux avant la pluie, car elle contrôle directement la proportion de chaux fixée en surface de la chaussée et par conséquent le risque d'entraînement de la chaux par lessivage, donc de concentration en chaux de l'eau à l'exutoire.

### 3.2 Évaluation expérimentale de l'impact l'épandage de lait de chaux

#### 3.2.1 Analyse en laboratoire de l'impact potentiel du lait de chaux

Les analyses physico-chimiques en laboratoire du lait de chaux étudié ont permis de démontrer les points suivants :

- les paramètres conventionnels (MES et turbidité) ne sont pas fiables pour évaluer les particules en suspension, du fait de la granulométrie de la fraction soluble (particules inférieures à la porosité du filtre) et de la présence de tensio-actifs (effet de floculation). Pour caractériser l'impact particulaire, le résidu sec à 105°C, qui permet de s'affranchir des problèmes cités ci-dessus, a été retenu pour la phase 2 ;
- le pH mesuré est fortement basique pour des concentrations en lait de chaux peu élevées (pH = 8,8 pour une solution à 0,05 g/l du produit étudié) ;
- un apport d'espèces ioniques (principalement calcium et magnésium) peut provoquer des augmentations significatives de la conductivité du milieu récepteur ;
- pour les valeurs de pH mesurées, le TA mesuré par virage de la phénolphtaléine apparaît comme le paramètre pertinent pour suivre l'alcalinité durant la phase 2 ;
- un essai de calcination à 550°C du produit commercial a permis de démontrer que 10 % du produit brut (20 % des matières sèches) est d'origine organique ;
- les essais réalisés sur des solutions aqueuses de lait de chaux ne permettent de quantifier une DCO qu'à partir d'une concentration en produit testé de 5 g/l ;
- un effet de floculation des particules de lait de chaux en suspension sous l'effet des tensio-actifs a été démontré, permettant de faciliter la décantation par gravité.

Les impacts environnementaux potentiels à prendre en compte suite aux analyses réalisées en laboratoire apparaissent être les suivants :

- les effets néfastes liés à la partie solide de la suspension de lait de chaux (turbidité, éléments fins de taille inférieure à 1  $\mu\text{m}$ , effet de floculation), pouvant provoquer un frein à la photosynthèse, des dépôts sur les ouïes des poissons, des dépôts de sédiments pouvant contribuer au colmatage des frayères ;
- des pH potentiellement élevés susceptibles de déplacer des équilibres ioniques en faveur d'espèces chimiques préjudiciables pour la vie piscicole ;
- des apports de carbonates provoquant un accroissement de l'alcalinité et en conséquence une basification du milieu récepteur propice à favoriser des espèces chimiques incompatibles avec la vie piscicole ;
- un apport de pollution d'origine organique modéré voire quasiment nul.

De fait, les paramètres suivants apparaissent comme les plus pertinents pour caractériser les prélèvements de la phase 2 de l'étude : résidu sec à 105°C, pH, conductivité, alcalinité (mesure du TA), DCO. Concernant ce dernier paramètre, les analyses se sont limitées lors des essais à des mesures de DCO sur un échantillon composite.

### 3.2.2 Effet de la quantité de lait de chaux épandue

L'effet de la quantité de lait de chaux épandue sur les concentrations en chaux à l'exutoire du modèle réduit de chaussée a été étudié par comparaison entre les essais 2019-E1 et 2020-E1 (*Tableau 2*). Le bilan de masse de ces essais est présenté dans le *Tableau 5*.

*Tableau 5 – Bilans de masse des essais 2019-E1 et 2020-E1*

Essai	Quantité de lait de chaux épandue (g/m <sup>2</sup> )	Masse totale de Ca(OH) <sub>2</sub> épandue (g)	Masse totale de Ca(OH) <sub>2</sub> lessivée (g)	Masse totale de Ca(OH) <sub>2</sub> résiduelle sur plaque (g)	Pourcentage de Ca(OH) <sub>2</sub> lessivée
2019-E1	20	27,52	5,42	22,10	19,7 %
2020-E1	30	41,28	37,39	3,89	90,6 %
<i>Ecart entre essais</i>	<i>+10</i>	<i>+13,76</i>	<i>+31,97</i>	<i>-18,21</i>	<i>+70,9 %</i>

Quel que soit l'essai considéré, le bilan de masse montre qu'une part de la chaux épandue n'est pas lessivée et est retenue sur l'enduit superficiel de la plaque d'essai. Cette rétention s'explique par des processus à la fois physiques et chimiques bien connus [5] :

- un phénomène de rétention mécanique de la chaux dans les interstices en creux de l'enduit superficiel,
- une réaction de la chaux avec le liant hydrocarboné de l'enduit superficiel.

Toutefois, le *Tableau 5* met en évidence une différence de quantité de chaux lessivée entre les 2 essais : le pourcentage de chaux lessivée lors de l'essai 2019-E1 (20 g/m<sup>2</sup> de lait de chaux) est de l'ordre de 20 %, alors qu'il est de l'ordre de 90 % lors de l'essai 2020-E1 (30 g/m<sup>2</sup> de lait de chaux). Malgré les incertitudes associées au changement de plaque d'essai entre les campagnes 2019 et 2020, ce résultat peut être considéré comme significatif.

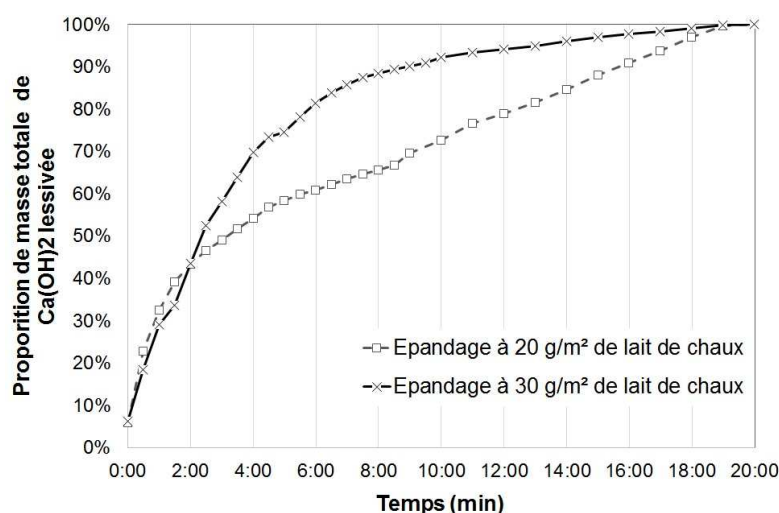


Figure 3 - Cinétique d'entraînement de la chaux lessivée en fonction de la quantité de lait de chaux épanchée sur le modèle réduit de chaussée

La Figure 3 met en évidence la cinétique d'entraînement de la chaux lessivée au cours des essais. Quelle que soit la quantité de lait de chaux épanchée, le lessivage de la chaux se fait majoritairement en début de pluie, comme le prévoyaient les simulations (cf. Phase 1). Plus de 50% de la chaux lessivée est entraînée à l'exutoire au bout de 4 min. Initialement similaire, la cinétique de lessivage évolue différemment entre les 2 essais, le lessivage de la chaux étant plus rapide pour une quantité initiale de lait de chaux épanchée de 30 g/m<sup>2</sup>.

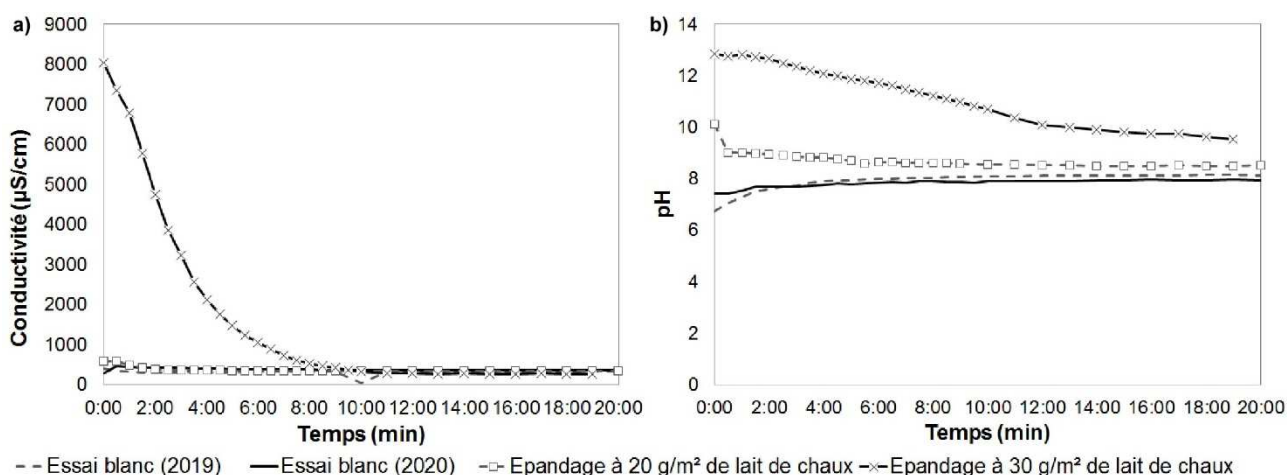


Figure 4 - Évolution de la conductivité (a) et du pH (b) des eaux de lessivage en fonction de la quantité de lait de chaux épanchée sur le modèle réduit de chaussée

D'un point de vue qualitatif, les essais montrent que le lessivage de la chaux par les eaux de ruissellement d'une pluie d'orage est responsable d'une élévation significative de la conductivité (Figure 4a) et du pH (Figure 4b), ainsi que d'autres paramètres suivis (alcalinité et matières en suspension). L'impact environnemental du lait de chaux est plus marqué et concentré sur les premiers flux d'eaux de lessivage, ce qui confirme les résultats de l'approche théorique menée en phase 1 de l'étude. L'impact le plus fort (à la fois en termes de valeurs mesurées et de durée) concerne la basicité des eaux superficielles collectées à l'exutoire (valeurs de pH). L'évolution du pH à l'exutoire montre en effet que celui-ci est systématiquement plus élevé que celui mesuré lors de l'essai « blanc », quel que soit l'essai considéré. L'impact environnemental du lait de chaux est toutefois nettement réduit dans le cas d'un traitement à 20 g/m<sup>2</sup> de lait de chaux. Pour cette quantité épanchée, en dehors du pH, les valeurs des paramètres suivis (MES, TAC et conductivité) redeviennent proches de celles des essais blancs après les premiers flux des rejets.

### 3.2.3 Effet du nombre d'épandages consécutifs

L'effet du nombre d'épandages consécutifs sur la qualité des rejets à l'exutoire du modèle réduit de chaussée a été étudié par comparaison entre les essais 2020-E1, 2020-E2 et 2020-E3. Cela correspond à 3 épandages de lait de chaux consécutifs entrecoupés chaque fois par un lessivage du modèle réduit de chaussée.

L'évolution des paramètres physico-chimiques suivis sont similaires sur les 3 essais. Après plusieurs épandages consécutifs, une plus lente diminution des conductivités (*Figure 5a*) et des pH (*Figure 5b*) a été observée. Concernant les pH notamment, ces derniers restent élevés (>10) sur la durée totale de l'essai 2020-E3. Ce constat peut s'expliquer par un entraînement plus lent et un possible déstockage de chaux accumulée sur la chaussée. Ainsi, plusieurs épandages consécutifs peuvent conduire à un impact plus fort des rejets d'eaux de lessivage en termes de basicité.

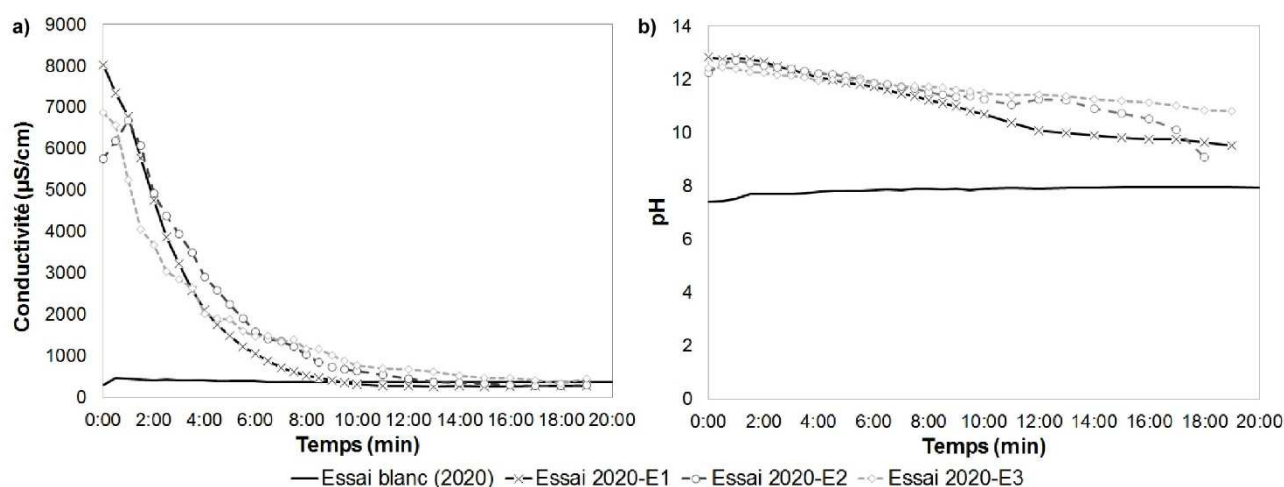


Figure 5 - Évolution de la conductivité (a) et du pH (b) des eaux de lessivage du modèle réduit de chaussée après plusieurs épandages consécutifs (campagne d'essais 2020, par ordre chronologique : 2020-E1, 2020-E2, 2020-E3)

### 3.2.4 Effet de la durée de séchage

L'effet de la durée de séchage du lait de chaux sur la chaussée (i.e. le temps entre l'épandage de lait de chaux et le début d'une pluie lessivant la chaussée) sur la qualité des rejets à l'exutoire du modèle réduit de chaussée a été étudié par comparaison entre les essais 2020-E3 et 2020-E4. Le bilan de masse de ces essais est présenté dans le Tableau 6. Il met nettement en évidence l'abaissement significatif de la quantité de chaux lessivée pour un temps de séchage de 60 h par rapport à un temps de séchage de 1h. Les masses de chaux lessivées sont proches de l'essai à blanc pour une durée de séchage de 60h.

Tableau 6 – Bilans de masse des essais 2019-E3 et 2020-E4

Essai	Durée de séchage (h)	M totale de Ca(OH) <sub>2</sub> épandue (g)	M totale de Ca(OH) <sub>2</sub> lessivée (g)	M totale de Ca(OH) <sub>2</sub> résiduelle sur plaque (g)	Taux de Ca(OH) <sub>2</sub> lessivée
2019-E3	1	41,28	32,89	8,39	79,7 %
2020-E4	60	41,28	4,42	36,86	10,7 %
<i>Ecart entre essais</i>	<i>+59</i>		<i>-28,47</i>	<i>-30,47</i>	<i>+69,0 %</i>

En ce qui concerne la qualité des rejets, le Titre Alcalimétrique et la conductivité des rejets d'eaux de lessivage ont des valeurs proches de celles de l'essai blanc pour l'essai réalisé avec une durée de séchage de 60 h (Figure 6a). Pour cet essai, le pH reste inférieur au pH du rejet de l'essai réalisé avec un temps de séchage de 1h, mais est significativement plus élevé que le pH de l'essai blanc (Figure 6b). En ce qui concerne la DCO, réalisée sur un échantillon composite représentatif du ruissellement total collecté, elle est, à dosage de chaux équivalent, abattue d'un facteur 2 pour un temps de séchage de 60h au lieu de 1h. Ces résultats montrent que le temps de séchage est un paramètre de contrôle prépondérant de la qualité des rejets d'eaux de lessivage de chaussée traitée au lait de chaux.

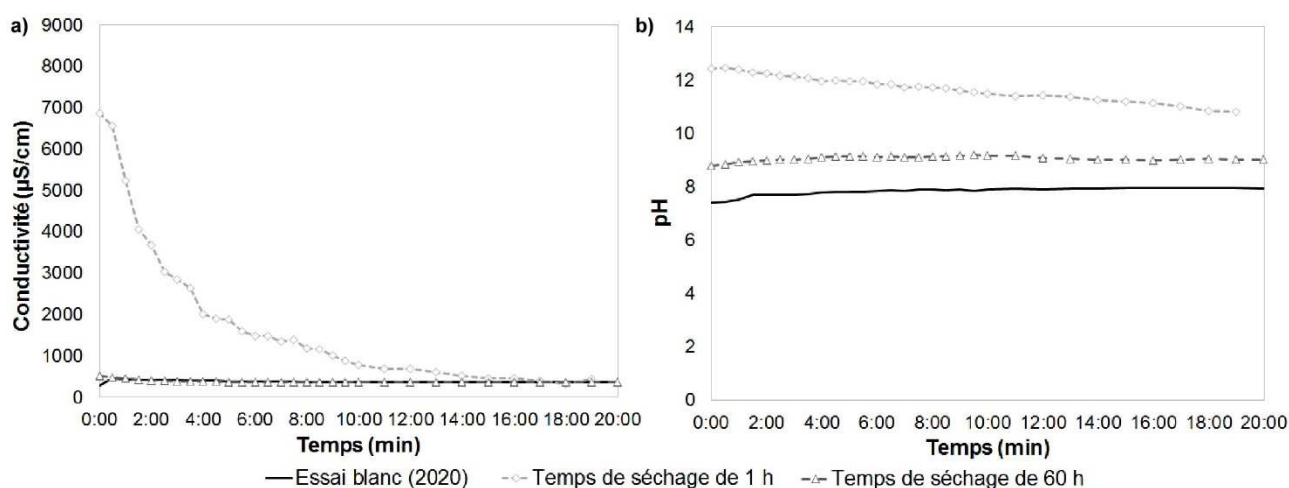


Figure 6 - Évolution de la conductivité (a) et du pH (b) des eaux de lessivage en fonction du temps de séchage sur le modèle réduit de chaussée

### 3.3 Évaluation *in situ* de l'impact sur le milieu aquatique

Le Tableau 7 récapitule les résultats des analyses des 3 années de suivi du cours d'eau témoin. Pour les paramètres concernés, le guide technique relatif à l'évaluation de l'état des eaux de surface continentales [8] a été utilisé pour indiquer les classes de qualité.

Les résultats physico-chimiques ne permettent pas de constater de variations suffisamment significatives entre le point amont et le point aval susceptibles de démontrer un potentiel impact sur le cours d'eau témoin lié à l'utilisation du lait de chaux pour la lutte contre le phénomène de ressuage de la chaussée située en surplomb.

En termes d'hydrobiologie, les taxons dominants sont sensiblement identiques entre l'amont et l'aval du point de rejet tandis que la comparaison des peuplements ne montre pas d'évolution significative qui indiquerait une dégradation du milieu. Ainsi, l'application de l'Indice Invertébrés Multi-Métrique (I2M2) sur les 2 stations de prélèvements ne permet pas de mettre en évidence un impact éventuel du lait de chaux appliqué sur la chaussée.

Tableau 7 – Synthèse des résultats d'analyses physico-chimiques et hydrobiologiques (en couleur, les classes de qualité des rejets [3] : bleu = très bonne qualité, vert = bonne qualité, jaune = qualité moyenne, orange = qualité médiocre, rouge = qualité mauvaise)

Année	Paramètres	Avant épandage (printemps)		Après épandage (automne)	
		Amont	Aval	Amont	Aval
2019	MES (en mg/l)	6	5	<2	<2
	Saturation en O2 (en %)	89,8	82,6	94,2	93,5
	DCO (en mg/l O2)	<20	<20	20	22
	pH	8,38	8,23	7,72	7,75
	Conductivité (en µS/cm)	240	270	241	249
	Calcium (en mg/l)	23,6	26,4	24,8	25,0
	Magnésium (en mg/l)	6,62	7,37	6,64	6,71
	TAC (en °F)	8,5	9,5	7,3	7,4
	TA (en °F)	0	0	0	0
	I2M2	0,5362	0,2966	0,4413	0,4355
2020	MES (en mg/l)	2	<2	4	<2
	Saturation en O2 (en %)	89,5	86,3	non mesuré	non mesuré
	DCO (en mg/l O2)	<20	<20	<20	21
	pH	7,53	7,78	8,75	8,42
	Conductivité (en µS/cm)	185	202	286	330
	Calcium (en mg/l)	17,8	21,3	29,2	33,3
	Magnésium (en mg/l)	5,33	5,46	6,82	7,80
	TAC (en °F)	8,2	7,8	7,5	7,8
	TA (en °F)	0	0	0	0
	I2M2	0,3413	0,4183	0,1295	0,1718
2021	MES (en mg/l)	22	8	7	5
	Saturation en O2 (en %)	non mesuré	non mesuré	94,9	94,7
	DCO (en mg/l O2)	33	33	<20	<20
	pH	8,24	8,25	7,40	8,00
	Conductivité (en µS/cm)	207	213	180	185
	Calcium (en mg/l)	22,2	19,3	22,6	23,4
	Magnésium (en mg/l)	5,52	5,48	4,98	5,21
	TAC (en °F)	9,2	9,3	7,8	8,2
	TA (en °F)	0	0	0	0
	I2M2	0,4026	0,3984	0,5772	0,5009

Globalement, pour un nombre d'épandage modéré au cours des 3 années de suivi (un épandage préventif une fois par an en période estivale), les résultats obtenus en amont et en aval du site expérimental ne permettent pas, d'un point de vue physico-chimique et hydrobiologique, de démontrer un impact potentiel sur le cours d'eau témoin du lait de chaux utilisé pour le traitement du ressuage. Il convient cependant d'appréhender ces premières conclusions avec précaution du fait de l'incertitude sur le fait que le lait de chaux ait atteint le cours d'eau. En effet, les eaux de lessivage du tronçon étudié ne se rejettent pas directement dans le cours d'eau témoin, mais transitent par un système de bandes enherbées et de fossés pouvant contribuer à la rétention de la chaux. Un suivi en continu de la conductivité et du pH au niveau du rejet dans le cours d'eau aurait été nécessaire pour lever cette incertitude. Par ailleurs, en complément de l'I2M2, l'indice de Jaccard permettrait d'analyser de façon plus complète l'impact sur les macro-invertébrés benthiques.



### 3.4 Bilan des résultats et implications opérationnelles

Les résultats mettent en avant un possible impact saisonnier des épandages de lait de chaux sur les eaux superficielles en cas de lessivage des ESU traités contre le phénomène de ressuage. L'étude réalisée montre que :

- l'essentiel du lessivage se produit au début d'une pluie, les concentrations en chaux hydratée étant plus élevées lors des premiers flux rejetés ;
- le risque de lessivage du lait de chaux appliqué sur la chaussée est d'autant plus faible que le temps de séchage est long, que la quantité épandue est faible et dans une moindre mesure que le nombre d'épandage consécutif est limité.

Il découle de ces résultats des implications opérationnelles à l'attention des gestionnaires de routes rurales revêtues d'ESU. Pour tout épandage de lait de chaux visant à traiter le phénomène de ressuage, il est recommandé d'adapter les préconisations de quantité d'épandage à la vulnérabilité des milieux aquatiques superficiels récepteurs. Si les milieux aquatiques superficiels récepteurs sont vulnérables, il est recommandé :

- de réaliser le traitement en dehors des périodes à risque élevé de pluie dans les quelques heures suivant l'épandage de lait de chaux ;
- de réaliser des épandages n'excédant pas 20 g/m<sup>2</sup> de lait de chaux ;
- de n'effectuer les épandages qu'en un seul passage et sur des enduits superficiels n'ayant pas déjà fait l'objet d'un traitement récent au lait de chaux.

La vulnérabilité des milieux aquatiques superficiels peut être évaluée en s'appuyant sur les principes définis dans la méthode de hiérarchisation de la vulnérabilité de la ressource en eau du Cerema [9], en appréciant le temps de propagation entre les points de rejet des eaux en provenance de la chaussée et les usages (de façon non-exhaustive : prise d'eau en rivière, zone d'aquaculture, zone de loisirs liés à l'eau) ou les milieux naturels remarquables inféodés à l'eau en aval hydraulique du rejet.

Les routes rurales ne sont pas systématiquement bordées de bandes enherbées et de fossés assurant un rôle tampon vis-à-vis des masses d'eau superficielles, tel que c'était le cas sur le tronçon étudié. Ainsi, une vigilance accrue doit être portée sur les routes rurales rejetant directement les eaux de lessivage dans un cours d'eau.

Pour les cas particuliers où l'infrastructure est munie d'un dispositif d'assainissement routier respectant les règles de l'art de collecte et traitement définies dans les guides techniques [10,11], l'épandage de lait de chaux peut également être assuré normalement. En effet, le phénomène de floculation des particules en suspension, mis en avant par les analyses en laboratoire, permet d'assurer une décantation rapide de la suspension, suggérant que la chaux sera captée par le système d'assainissement routier et n'impactera donc pas les milieux récepteurs.

## 4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude est la seule, à notre connaissance, qui ait tenté d'évaluer l'impact environnemental de la pratique d'épandage de lait de chaux pour traiter le phénomène de ressuage des ESU. Si les résultats mettent en avant un impact environnemental faible, voire inexistant, sur les eaux de surface, en cas de lessivage des routes traitées, il n'en reste pas moins que le lait de chaux est un produit alcalin, donc potentiellement toxique pour les milieux aquatiques. Par ailleurs, il apparaît important de veiller à ce que les fournisseurs de suspensions de lait de chaux utilisées pour traiter le ressuage d'ESU n'ajoutent pas aux produits commercialisés, des additifs susceptibles d'accroître l'impact environnemental, et

notamment d'entraîner une pollution organique. Cette vigilance est d'autant plus cruciale dans les zones rurales situées en tête de bassins versants, riches en sources et en milieux humides oligotrophes particulièrement sensibles aux fluctuations de pH ou de charge organique.

Au-delà des risques pour les milieux aquatiques, il conviendrait aussi d'analyser l'empreinte écologique globale de la pratique d'épandage de lait de chaux, à l'instar de ce qui a été réalisé pour les techniques d'intégration de la chaux hydratée dans les mélanges bitumineux, pour mettre en œuvre la couche de roulement [12].

Dans le cas de la pratique innovante d'épandage de lait de chaux en phase d'exploitation de la route, analysée dans cette étude, l'empreinte écologique globale serait à analyser en mobilisant des méthodes d'analyse du cycle de vie (ACV) au regard à la fois :

- des économies de granulats, si cette pratique évite de gravillonner la chaussée qui a ressué pour sécuriser le trafic ;
- des économies de réfection de chaussée, si la pratique augmente la durée de vie de la couche de roulement et évite des travaux de réfection après la période estivale.

## RÉFÉRENCES

1. IDDRIM (2017) Enduits superficiels d'usure. Cerema, Collection Références, 99 p.
2. LCPC (1998) Méthode essai n°52. Catalogue des dégradations de surfaces des chaussées. LCPC, 93 p.
3. Lawson W. D., Leaverton M., Senadheera S. (2007) Maintenance Solutions for Bleeding and Flushed Pavements Surfaced with a Seal Coat or Surface Treatment. Texas Tech University, 126 p. + annexes
4. Little D.N., Epps J.A., Sebaaly P.E. (2006) The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt. National Lime Association, 79 p.
5. Little D.N. et Petersen J.C. (2005) Unique Effects of Hydrated Lime Filler on the Performance-Related Properties of Asphalt Cements : Physical and Chemical Interactions Revisited. Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 17 No. 2, pp 31-35
6. Keifer C. J., and H. H. Chu (1957) Synthetic storm pattern for drainage design, ASCE Journal of the Hydraulics Division, 83 (HY4), pp 1-25
7. Bujon G. (1988) Prédiction des débits et des flux polluants transités par les réseaux d'égouts par temps de pluie - Le modèle FLUPOL, La Houille Blanche, N°1-1988, pp 11-23
8. Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (2019) Guide technique relatif à l'évaluation de l'état des eaux de surface continentales (cours d'eau, canaux, plans d'eau). 44 p. + annexes
9. Cerema (2014) Méthode de hiérarchisation de la vulnérabilité de la ressource en eau. Cerema, note d'information Environnement-Santé-Risques, 14 p.
10. Setra (2006) Assainissement routier. Guide technique, 94 p.
11. Setra (2007) Pollution d'origine routière - Conception des ouvrages de traitement des eaux. Guide technique, 88 p.
12. T. Schlegel, D. Puiatti, H.-J. Ritter, D. Lesueur, C. Denayer, A. Shtiza (2016) The limits of partial life cycle assessment studies in road construction practices: A case study on the use of hydrated lime in Hot Mix Asphalt. Transportation Research Part D 48, pp 141–160