



# LA POLLUTION PAR LES SELS DE VOIRIE

Noémie COULON  
Simon VIART  
Eleni .



# Sommaire

Introduction p 4

1. Les sources des sels de voirie dans l'environnement. p 5

1.1. Identification et applications. p 5

1.2. Voies de pénétration dans la nature. p 7

1.3. Quantités rejetées. p 8

2. L'impact sur l'environnement. p 10

2.1. Vecteurs de transport. p 10

2.2. Quantités dans les différentes phases. p 12

2.3. Impact sur le vivant. p 13

3. Prise de conscience et pistes d'actions. p 17

3.1. Solutions et alternatives. p 17

3.2. Réglementations. p 18

3.3. La France, un problème mal résolu. p 19

Conclusion p 20

Bibliographie p 21

## Introduction

En 2010, le nombre d'automobilistes qui ont perdu la vie sur les routes de France s'est chiffré à 3994.<sup>1</sup> Ce chiffre représente la moitié du nombre de victimes tuées sur les routes en 2001 dans notre pays.<sup>2</sup> Durant les périodes hivernales, l'application de sels de déglacage sur les chaussées est devenue incontournable pour garantir une sécurité routière par toutes conditions météorologiques. Ils empêchent l'apparition de gel et permettent de faire fondre les verglas déjà formés.

L'utilisation de sels de voirie, outre les solutions qu'elle apporte à la baisse de cette mortalité au volant, présente des impacts sur l'environnement. En effet, les produits déversés peuvent, par différents vecteurs de transport, s'introduire dans les milieux naturels et se révéler toxiques pour certains organismes.

Afin de mieux utiliser ces sels de voirie, il convient de décrire cette pollution et de quantifier les proportions au delà desquelles ils présenteront une réelle menace écologique.

Dans ce rapport, nous nous intéresserons tout d'abord aux sources de ces sels de voirie dans l'environnement, à leurs différentes applications sur les routes et à leur composition, afin de décrire qualitativement et quantitativement les espèces rejetées. Dans un second point, nous caractériserons la pollution que ces sels représentent, en traitant de la mobilité des éléments dans les milieux naturels et des différents impacts sur chacun d'eux. Enfin, la dernière partie de cet exposé traitera de la prise de conscience de la pollution, et des mesures prises pour limiter les impacts environnementaux des sels de voirie.

## 1. Les Sources des sels de voirie dans l'environnement.

### 1. 1. Identification et applications

Afin de présenter au mieux les impacts environnementaux des sels de voirie, il est tout d'abord nécessaire de décrire leurs différentes applications, les identifier et donc estimer quelles seront les espèces relâchées, et en quelles quantités.

Les sels de voiries regroupent l'ensemble des sels destinés à l'entretien des routes. Durant l'hiver, ils sont utilisés pour leur propriété d'abaisser le point de congélation de l'eau, empêchant ainsi la formation de glace sur les chaussées mouillées à des températures négatives, tout en faisant fondre la glace déjà présente. On parle alors de sels de déglacage, ou de fondants routier. Certains de ces sels sont aussi employés comme agents de pré-mouillage du sel et du sable/abrasif pour l'entretien des routes en hiver, stabilisant les mélanges de base après leur pulvérisation. A des températures plus élevées et généralement en moins grandes quantités, les sels de voiries sont aussi utilisés comme abats-poussière, gardant le sol humide lorsqu'ils y sont épandus, empêchant la poussière de s'élever et diminuant la perte d'agrégats sur les routes.

Les composés présents dans les sels de voirie peuvent être classés en trois groupes<sup>3</sup> :

- Les sels à proprement parlé sont des composés ioniques composés de cations et d'anions formant une molécule neutre, sans charge nette. Les sels de voiries sont caractérisés par des chlorures, qui offrent aux produits leurs propriétés principales, et représentant la très grande partie de leur pourcentage massique. Ces composés solubles sont représentés exclusivement par le chlorure de sodium NaCl, le chlorure de calcium CaCl<sub>2</sub>, le chlorure de magnésium MgCl<sub>2</sub> et le chlorure de potassium KCl.
- Dans certains cas, des ferrocyanures peuvent aussi être ajoutés à ces sels de voiries, en faibles proportions, comme additifs anti-agglomérant. Ces substances peu solubles alors utilisées sont principalement représentées par le ferrocyanure de sodium hydraté Na<sub>4</sub>Fe(CN)<sub>6</sub>·10H<sub>2</sub>O.
- Les insolubles et les éléments traces peuvent constituer jusqu'à 5% du poids des fondants routier à base de chlorure de sodium. La teneur de ces éléments, indépendante de l'efficacité de déglacage, varie en fonction de l'origine des fondants routier<sup>4</sup>. Les insolubles peuvent être constitués de carbonates, sulfates, silicates, sables ou argiles. Les éléments traces sont principalement des éléments métalliques comme le cadmium (Cd), l'arsenic (As), le mercure (Hg), le plomb (Pb), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le fer (Fe) etc.

Les propriétés physico-chimiques de chacun des sels vont conditionner leur utilisation. Concernant les traitements de déglacage, la principale propriété utilisée est la capacité des sels à abaisser la température de congélation de l'eau. Cette propriété dite cryoscopique -ou encore "taux de fonte"- est caractérisée par la température eutectique associée à chacun des sels, température minimale pour laquelle le sel permettra de garder l'eau à l'état liquide. Cette température est cependant à dissocier de la température d'emploi, en dessous de laquelle la vitesse de réaction devient trop lente pour garantir la fonte de la glace. Même si le chlorure de calcium présente une température eutectique plus faible que les autres chlorures, et donc un taux de fonte plus élevé, c'est le chlorure de sodium, moins cher, qui sera le plus largement utilisé comme agent de déglacage. Les chlorures de magnésium et de potassium seront aussi utilisés comme sels de déglacage à très faibles proportions.

Enfin, les chlorures  $\text{CaCl}_2$  et  $\text{MgCl}_2$  mélangés au chlorure de sodium permettent de garantir l'efficacité du fondant routier à des températures plus faibles que celle permise par l'utilisation de chlorure de sodium seul, tout en favorisant son entrée en solution<sup>3</sup>.

L'autre utilisation principale des sels de voirie est associée à leur application en tant qu'abats poussière. La propriété recherchée est alors la capacité hygroscopique des sels, leur faculté de capter l'humidité de l'air afin d'empêcher les poussières de s'élever. Les sels les plus employés à cette utilisation sont le chlorure de magnésium et surtout le chlorure de calcium  $\text{CaCl}_2$ , ce dernier ayant la propriété de se liquéfier simultanément après avoir capté l'eau, présentant une déliquescence très importante.

Le chlorure de calcium, par son taux de fonte élevé et sa forte capacité hygroscopique, est aussi le principal chlorure utilisé dans les solutions de pré-mouillage des sels de déglacage et des sables/abrasifs. Les produits de pré-mouillage humidifient le chlorure de sodium, permettant de faire fondre plus rapidement la couche de glace et limitant la quantité de sel requise. Le pré-mouillage des produits abrasifs limite aussi la quantité de sable/abrasif requise, en rendant les produits plus collants à la chaussée, et malléables à de plus faibles températures.

Substance	Utilisation spécifique	Poids moléculaire	Température Eutectique	Température d'emploi	Solubilité
<b>Chlorure de Sodium</b> ( $\text{NaCl}$ )	déglacage des routes, additif de déglacage pour le sable	58,44 g.mol <sup>-1</sup>	-21 °C	0 à -15 °C	35,7 à 0 °C
<b>Chlorure de calcium</b> ( $\text{CaCl}_2$ )	déglacage des routes, additif de déglacage, pré-mouillage, abat-poussière	110,99 g.mol <sup>-1</sup>	-51,1 °C	<-23 °C	37,1 à 0 °C
<b>Chlorure de magnésium</b> ( $\text{MgCl}_2$ )	déglacage des routes, additif de déglacage, abat-poussière	95,21g.mol <sup>-1</sup>	-33,3 °C	-15 °C	54,25 à 20 °C
<b>Chlorure de Potassium</b> ( $\text{KCl}$ )	agent de déglacage de remplacement pour les routes	74,55 g.mol <sup>-1</sup>	-10,5 °C	-3,89 °C	56,7 à 100 °C
<b>Ferrocyanure de sodium</b> , $\text{Na}_4\text{Fe}(\text{CN})_6 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$	additif anti-agglomérant	484,07 g.mol <sup>-1</sup>			31,85 à 20 °C

*Tableau 1. Propriétés des différentes substances actives dans les sels de voirie et utilisations spécifiques<sup>3</sup>.*

## 2. Voies de pénétration dans la nature.

Le rejet de sels de voiries dans l'environnement peut intervenir durant toutes les étapes de leur cycle de vie, ce qui représentera par la suite différentes pollutions. Ces sels peuvent s'introduire dans l'environnement avant leur épandage ( transport, stockage ), pendant leur application ou après leur épandage, par la fonte des neiges usées.

La première source de sels de déglacage dans l'environnement est bien sur liée à leur épandage. Pour ce point, chacune des utilisations des sels de voirie est caractérisée par des modes d'application différents, entraînant des quantités de sels différentes. Concernant les sels de déglacage, ces quantités de sels déversées varient selon le traitement que l'on applique. S'il s'agit d'un traitement préventif, effectué avant l'apparition du verglas, les doses de sel appliquées sont globalement moins importantes que s'il s'agit d'un traitement curatif. Il convient cependant de ne pas appliquer l'épandage trop longtemps avant l'apparition du verglas, pour que la teneur en sel des solutions appliquées ne soit pas diluée par les propriétés hygroscopiques des produits.

Sel solide	Saumure	Bouillie de sel
10 à 15 g/m <sup>2</sup>	12,5 à 25 cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> soit 4 à 8 g/m <sup>2</sup> de sel	8 à 10 g/m <sup>2</sup> de sel + 15 à 25% de saumure

Tableau 2. Masse de sel déversé par unité de surface, en fonction de l'état du fondant routier.<sup>3</sup>

Comme nous pouvons le constater, l'application d'une saumure nécessite une quantité de sel moins importante que l'épandage de sel solide, en traitement préventif. Cette technique présente cependant l'inconvénient de devoir être appliquée très peu de temps avant l'apparition du verglas, car la dilution des saumures peut s'avérer très rapide.

En traitement curatif, les dosages de sel employés sont de 15 à 20 g/m<sup>2</sup>. Le type de fondant utilisé est aussi à déterminer selon le type de verglas à traiter pour une efficacité optimale.

L'application d'abat-poussière nécessite une quantité de chlorure par unité de surface généralement supérieure à celle associée au déglacage. Concernant les produits à base de chlorure de calcium, le traitement peut s'effectuer soit par déversement de flocons, dont la pureté varie entre 77% et 98% à une quantité d'environ 0,9 kg/m<sup>2</sup>, soit par la dispersion d'une saumure à teneur en chlorure entre 35% et 38% pour une quantité déversée allant de 0,9 à 1,6 l/m<sup>2</sup>.<sup>5</sup> Les solutions de chlorure de magnésium seront généralement dosées à 35% de chlorure pour une application à 1,4 l/m<sup>2</sup>.<sup>5</sup>

Une partie des sels de voiries que l'on retrouve dans l'environnement s'y introduit lors de son stockage. Une étude au Canada a révélé que ce pourcentage de perte de sels et d'abrasifs peut représenter 20% de la quantité totale de produit utilisé lorsque celui-ci est entreposé à l'extérieur<sup>3</sup>. Cette perte serait seulement de 0,2% lorsque les stocks de sels sont placés en intérieur<sup>3</sup>. En France, les pertes sur stocks non couverts représenteraient en moyenne 5 à 8 % des sels utilisés comme fondants routiers.<sup>4</sup>

Il est difficile d'estimer la proportion des pertes de sels de voirie liées à leur transport. Celles ci comprennent les pertes dues à l'absence de bâche recouvrant les produits ou, plus rarement aux accidents des véhicules transporteurs. Contrairement aux précédentes sources, cette dernière sera à l'origine de pollutions ponctuelles des milieux naturels. De plus, nous verrons que les vecteurs de transport de ces sels dans l'environnement sont différents selon la source dont ils proviennent.

### 1. 3. Quantités rejetées dans l'environnement

Même s'il est difficile de donner un chiffre global sur la quantité de sels de voirie utilisée chaque année, on estime que le salage des routes est source de plusieurs dizaines de millions de tonnes de sels déversés tous les ans dans la nature, dont la majorité dans les pays de l'hémisphère nord.<sup>6</sup>

Le chlorure de sodium NaCl, principal agent de déglacage, reste le sel de voirie le plus utilisé dans le monde, représentant 99% du tonnage total épandu en France et en Europe.<sup>4</sup> Le sablage des routes diminue globalement pour des raisons économiques et environnementales. En effet, même si une tonne d'abrasif se révèle en moyenne moins coûteuse qu'une tonne de sel de déglacage, les quantités à appliquer sont près de 10 fois plus élevées, et il est nécessaire de ramasser les matériaux en fin de saison.<sup>7</sup> Sur le plan environnemental, une étude Suisse en 1997 a démontré qu'il valait mieux saler en respectant les bonnes pratiques plutôt que de gravillonner.<sup>7</sup>

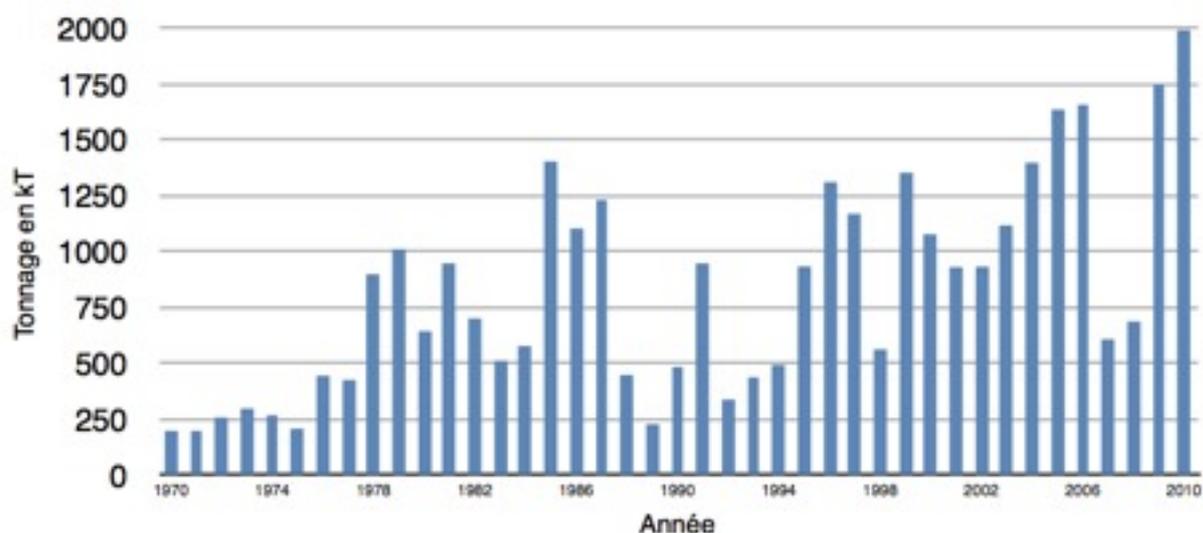


Figure 1. Consommation annuelle de fondant routier en France de 1970 à 2010.<sup>8</sup>

En France, la consommation moyenne annuelle de fondant routier sur les 20 dernières années s'élève à 1300 kilotonnes. L'utilisation de sels de déglacage peut fortement varier d'une année à l'autre suivant les conditions météorologiques. Si la vente annuelle de fondant routier en France se chiffrait à 230 kilotonnes pour l'année 1989, 2010 a vu les ventes atteindre un record de 2 millions de tonnes annuelles.<sup>8</sup> Si l'on observe l'évolution des quantités de sels de déglacage vendues dans notre pays sur les 40 dernières années, on constate une très nette augmentation de son utilisation. L'épandage de fondant routier n'étant évidemment pas uniforme sur tout le territoire, une étude sur les régions françaises les plus concernées ont mis en évidence un déversement annuel pouvant atteindre 10 à 80 tonnes par kilomètre carré sur les routes les plus touchées. Ainsi, la consommation de fondant routier durant la période hivernale 2010 2011 s'est chiffrée à 31 750 tonnes uniquement pour l'est de la France.<sup>9</sup>

Les stocks non-couverts et les pertes liées au transport de sels de déglacage seraient, en France, source d'une quantité de chlorure estimée entre 40 et 70 kilotonnes.<sup>4</sup>

Parmi les grands utilisateurs de sels de voirie, le Canada est le pays pour lequel nous avons réussi à récolter le plus de données car la prise de conscience de ces polluants y est très développée. Dans ce pays, des études ont révélé que la quantité totale de sels de voiries rejetés ou perdus dans

l'environnement se chiffrait à 4,9 millions de tonnes par an, à la fin des années 90, pour un réseau routier d'environ un million de kilomètres.<sup>6</sup> Ce chiffre permet d'évaluer la quantité annuelle de chlorures disséminés dans la nature à environ 3 millions de tonnes, principalement de chlorures de sodium.<sup>6</sup> Le déversement annuel d'autres chlorures se chiffrent à 25 kT de MgCl<sub>2</sub> et 2 kT de KCl.<sup>4</sup> Les sels de voiries utilisés dans ce pays en abat poussière représenteraient seulement 103 kilotonnes de chlorures, dont 98 de chlorure de calcium et 5 kT de chlorure de magnésium pour l'année 2000.<sup>10</sup> Cette consommation aurait diminuer depuis 1995 où les quantités de chlorure de calcium utilisées comme abat poussière et pour la construction des routes s'élevaient à 201 kilotonnes.

La même étude canadienne quantifiant la perte de sels de voirie durant leur stockage a estimé que, sur 190 dépôts de voirie étudiés, 128 kT de sel rejetées seraient issues stocks non couverts pour une quantité totale de 140 kilotonnes de sel perdues dans les entrepôts chaque année.<sup>10</sup>

Si l'on revient aux quantités totales de chlorure déversé, on compte, parmi les mauvais élèves, les Etats unis, dont le réseau routier se chiffre à 2,6 millions de kilomètres, qui utiliseraient quant à eux 10 à 20 millions de tonnes de sels de voiries chaque année. La Suisse, dont le réseau routier représente 71 000 km, affiche une consommation de fondant routier moyenne de l'ordre de 160 kilotonnes par an.<sup>11</sup>

Certains pays pourtant très exposés au gel des chaussées présentent une faible consommation de fondants routier. C'est le cas de la Suède, où l'équipement de chaines autour des pneus est plus développée, comme l'application d'abat poussière. L'utilisation moyenne de fondant routier y serait chiffrée à 250 kilotonnes annuelles pour un réseau routier de 500 000 kilomètres.<sup>11</sup>

<b>Pays</b>	<b>Réseau routier (en milliers de km)</b>	<b>Tonnage moyen annuel (en kilotonnes)</b>	<b>Taux linéaire (en t/km)</b>
Canada	1 000	5 000	5
Suisse	71	160	2,3
France	1 000	1 300	1,3
Suede	500	250	0,5

*Tableau 3. Consommation annuelle de fondant routier dans quatre pays. <sup>11</sup>*

Ces informations que nous avons récoltées nous ont permis de déterminer l'importance des différentes sources des sels de voirie dans l'environnement. Il convient cependant de rappeler que les quantités sels de voirie ne sont pas déversés uniformément sur les territoires et que l'épandage de certaines routes peut représenter un déversement de plusieurs dizaines de tonnes de chlorure par mètre carré et par an. Nous avons par ailleurs noté quels étaient les principaux chlorures constituant ces produits, le chlorure de sodium étant le constituant principal de ces sels de voirie, car il est l'agent de déglacage le plus en usage.

Voyons maintenant les impacts environnementaux que ces substances présentent.

## 2. L'Impact sur l'environnement.

### 2. 1. Les vecteurs de transport

- L'eau

L'eau est l'un des principaux vecteurs de transport des particules. Lors des différentes phases du cycle de vie des sels de voirie (pour rappel : stockage, transport, épandage et après épandage) les apports en eau entraînent les particules de sel vers d'autres milieux. Ces apports d'eau sont dus notamment aux précipitations et à la fonte des neiges.

Les sels dissous dans l'eau sont destinés soit au ruissellement soit à l'infiltration, comme nous illustre le cycle de l'eau. Ces deux phénomènes sont fonction de la nature des roches : une roche peu perméable, ou gorgée d'eau, ne permettra pas d'infiltration et en conséquence l'eau ruissellera selon plusieurs facteurs dont la topographie ; tandis qu'une roche perméable, dont la surface de la zone saturée se situe sous l'humus, permettra l'infiltration des substances dans le sol.

- L'infiltration :

La vitesse de propagation du polluant dépend de la nature du sol, de la granulométrie. Afin d'expliquer ces propos, comparons un sol à gravier et un sol argileux. La granulométrie d'un sol à gravier est de l'ordre du centimètre tandis que celui d'un sol argileux est, au maximum, de 2 micromètres. Une forte granulométrie induit un écoulement de l'eau rapide, le polluant n'est pas présent suffisamment longtemps dans le sol pour interagir avec lui. Dans le cas d'une granulométrie faible (argiles) l'écoulement est lent, le polluant interagit abondamment avec le milieu et peut même demeurer dans les espaces interstitiels des grains. Ces deux pollutions sont à distinguer. Quand une pollution se produit, elle s'infiltré d'abord verticalement (par gravité) dans la zone non saturée jusqu'à atteindre la zone saturée. Puis elle se propage horizontalement dans la zone saturée. Dans le cas des sels, qui sont dilués dans l'eau, la pollution se propage dans la totalité de la nappe. L'eau salée, étant plus dense que l'eau douce, se situera dans la partie inférieure de la zone saturée.

- Le ruissellement :

Ce phénomène a lieu lorsque le sol est peu perméable ou gorgé d'eau et ne peut plus en contenir. Cette eau, n'étant pas absorbée par le sol, ruisselle en fonction de la topographie jusqu'à parvenir à un milieu perméable ou aquatique (lac, rivière, océan...).

D'après C. Cosandey du CNRS<sup>12</sup> «L'intensité du ruissellement dépend de la nature du sol, de sa pente, de son état d'humidité, de l'existence ou non d'un couvert végétal ou d'accidents de terrain, naturels ou artificiels, ainsi que de l'intensité et de la durée de la pluie. »

- Le vent

Le vent est le second principal vecteur de transport des particules. Il intervient particulièrement lors du stockage des sels de voirie, ainsi que pendant et après l'épandage.

Les phénomènes principaux que vont subir des fondants routiers sont le transport de particules et/ou la nébulisation.

Le transport de particules est conditionné par plusieurs facteurs.<sup>13</sup> Ces facteurs sont : la susceptibilité du sol à l'érosion (en fonction de la granulométrie des particules, suspension pour les plus petites, saltation pour les moyennes et reptation pour les plus grosses), la rugosité de la surface (plus une surface est rugueuse, plus elle est résistante au vent), le climat (plus l'humidité est faible, moins il y a de résistance au vent), la longueur exposée de la zone (moins il y a d'obstacles plus le

vent est puissant et entraîne les particules) et le couvert végétal (sans couvert végétal le sol est d'autant plus propice à un transport des particules).

La nébulisation est un phénomène dû à la projection de gouttelettes, contenant les sels de déglacage, par les voitures. Ces gouttelettes peuvent ensuite retomber ou être emportées par le vent. D'après un rapport de McBean et Al-Nassri (1987)<sup>14</sup>, le transport des gouttelettes dépend de la vitesse des véhicules, du vent, de la déclivité des routes et des caractéristiques géométriques des routes. D'après Lausecker, Mauduit et Livet (2008)<sup>4</sup> la nébulisation entraîne ces sels, en grande partie, sur 40m de part et d'autre de la chaussée et à 400m si les meilleures conditions sont réunies.

- Les épanduses

Un dernier vecteur de transport peut être cité, celui dû au fonctionnement des saieuses. En effet, durant l'épandage sur les routes, on estime que 20 à 40 % du sel est projeté vers le bas coté des routes<sup>4</sup>. Ce serait dû à de mauvais réglages des saieuses. Ces sels pénètrent dans l'environnement sans même avoir eu leur utilité sur le déglacage des routes. Enfin, lors du nettoyage des épanduses qui concentrent une forte dose de sel, l'eau de lavage concentrée en sel va se retrouver directement dans les conduits d'eau usée et s'introduire dans l'environnement.

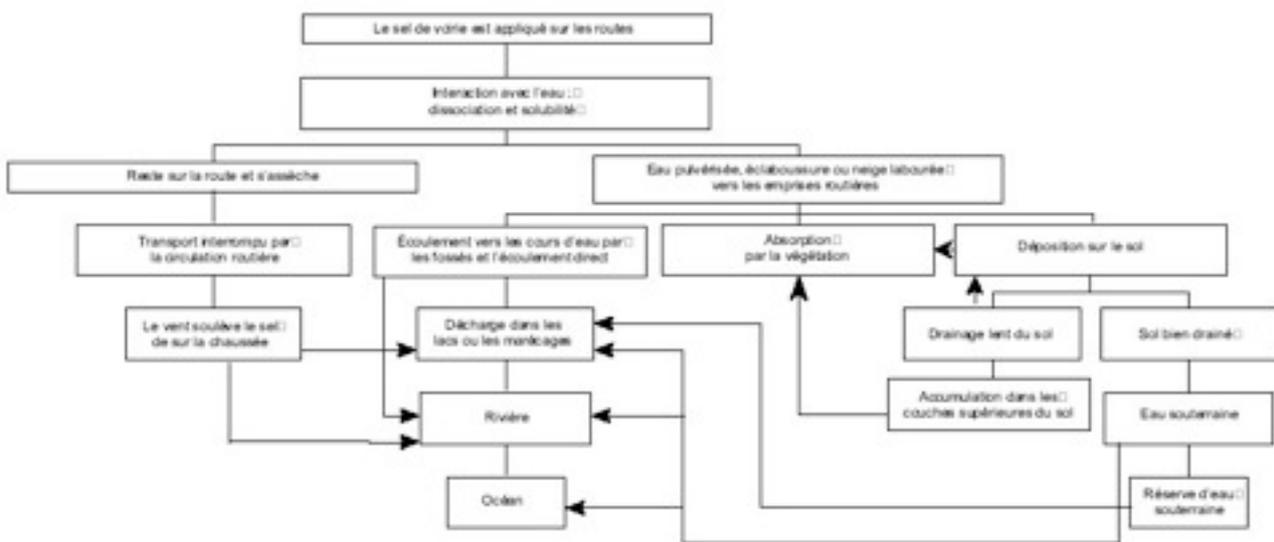


Figure 2. Cheminement des sels de voirie dans l'environnement.<sup>4</sup>

## 2. 2. Quantités de sels dans les différentes phases

- Les quantités de sels que l'on trouve normalement dans l'environnement

- ▶ Sol :

La teneur en chlorure dans les sols est généralement comprise autour de 500 µg/g.

- ▶ Ruissellement et eaux souterraines peu profondes

La teneur en chlorure dans les eaux de surface est normalement inférieure à 10 mg/l, la concentration maximale admissible pour la consommation étant de 200 se chiffrant à mg/l.

- ▶ Atmosphère

Même si peu d'études ont été faites à ce jour sur ce sujet, on estime la limite acceptable de chlorure dans l'air au Canada à 50 ppm.

- Quelques études et analyses des concentrations en sel

- ▶ Sol

MTO (1993-1999)<sup>13</sup>. Après avoir effectué 53 forages et prélevés 46 échantillons de sol autour d'une zone de stockage, des scientifiques ont mesuré les concentrations moyennes de chlore et de sodium respectivement à 2 100 et 2 600 µg/g de sol. Ces résultats révèlent donc une teneur en chlorure 4 fois supérieure à la concentration normale.

- ▶ Ruissellement

Rushton (1999)<sup>15</sup> a prélevé des échantillons dans un étang se trouvant à 250 m en aval d'un dépôt de voirie. La concentration de chlorure est passée de moins de 75 mg/L à environ 1 000 mg/L après la création de ce dépôt. Il y a donc un facteur cinq entre ces résultats et la concentration maximale acceptable en chlorure dans l'eau.

- ▶ Eaux souterraines peu profonde

MTO (1993-1999)<sup>13</sup>. Dans la même zone étudiée, ces chercheurs ont prélevés 102 échantillons dans des puits dont la profondeur variée de 0,26 et 5,25 m. La concentration moyenne de chlorure était de 2 600 mg/L et 69 % des échantillons avaient une concentration excédant 250 mg/L. Ces résultats dénotent donc une teneur anormalement élevée en chlorure, d'un facteur dix par rapport aux concentrations acceptables dans ces eaux.

- ▶ Atmosphère

A Montréal, en 2005 des études menées en périphérie de dépôts de voirie a révélée une concentration en chlorure dans l'air de 100 ppm, représentant le double du seuil d'acceptabilité.<sup>16</sup>

- ▶ Concentrations en Cyanure

Dans les régions où l'épandage annuel de sels de voirie est le plus élevé, la concentration en cyanure dans les eaux fontes peut atteindre 41,5mg/L. Sachant qu'une dose mortelle pour l'Homme se situe entre 0,5 et 3 mg/L de cyanure, la toxicité de ces doses est prouvée.

## 2. 3. Impact sur le vivant

### • Sous quelle forme les sels de voirie pénètrent-ils dans l'environnement ?

Les sels de voirie pénètrent dans l'environnement sous forme de sels ou sous forme d'ions dissociés (anions et cations correspondants). Tant que la solution n'est pas saturée en ces éléments ioniques, ils resteront dissous dans le milieu et pourront migrer en fonction des milieux où ils pénètrent.

Les sels de voirie étant composés principalement d'ions chlore, sodium, potassium, calcium, magnésium, ferrocyanure de sodium, ce sont leurs comportements que nous allons décrire.

#### ▶ L'anion chlore (Cl<sup>-</sup>)

D'après Wetzel (1975) et Hammer (1977)<sup>5</sup>, il est le principal élément qui contribue à la salinité et influe sur l'équilibre osmotique général.

C'est un ion à comportement conservateur (qui subit peu de réactions, échanges, complexations), sa concentration n'est pas influencée par ces phénomènes (Pringle 19815)

C'est un ion très soluble, mobile, qui ne se volatilise pas, qui précipite rarement (les conditions permettent rarement sa saturation dans le milieu), qui ne s'accumule pas à la surface des particules du sol. Il suit donc le cycle de l'eau et s'accumule dans les zones de stockages ou atteint directement les eaux de surfaces. Sa concentration est donc fortement importante lorsqu'il arrive dans les zones de stockages et son impact sur l'environnement sera d'autant plus important.

#### - Les cations sodium (Na<sup>+</sup>), potassium (K<sup>+</sup>), calcium (Ca<sup>+</sup>), magnésium (Mg<sup>+</sup>)

Ils ont tous un comportement non conservateur (ils interagissent avec le milieu par des processus d'échanges, de réactions, de complexations), une partie est donc retenue dans les particules du sol et la végétation, l'autre partie suit le cycle de l'eau.

Les cations sodium et potassium ont une réactivité chimique normale et de faibles besoins biotiques. Les particules négatives du sol vont les adsorbés (car ils ont des charges positives), ils prennent la place d'autres cations (Ca<sup>2+</sup>) et leur vitesse de transfert est ralentie.

Le cation calcium est le plus réactif, c'est un nutriment essentiel aux végétaux et algues. D'après Wetzel (1975)<sup>5</sup>, le calcium qui influence sur la distribution et la dynamique des algues et des plantes aquatiques plus grosses dans les écosystèmes dulcicoles.

Le cation magnésium est caractérisé par un composé plus soluble que les autres. Il sert de micronutriment dans la transformation enzymatique des organismes.

#### - Ferrocyanure de sodium (l'anti-agglomérant)

Il est très soluble dans l'eau et peut, lorsqu'il est exposé à la lumière, être dissocié en ion fer et ion cyanure (fortement toxiques pour les organismes aquatiques). Ils peuvent s'hydrolyser pour former du cyanure d'hydrogène, molécule volatile. D'après U.S EPA (1971)<sup>11</sup> une solution contenant 15,5 mg/L de ferrocyanure libérerait 3,8 mg/L de cyanure après une exposition à la lumière du soleil pendant 30 minutes. Sachant que

#### - Métaux lourds

Ils sont présents sur les chaussées et en éléments trace dans les sels de voirie, exposés à de fortes concentrations en sodium le risque de mobilisation augmente abondamment. Ils peuvent former des complexes avec les ions chlore, ce qui rend biodisponible le complexe qui rentre dans la chaîne alimentaire.

Afin de comprendre les impacts qu'ont ces éléments sur les différents milieux (aquatique, terrestre et atmosphérique) nous allons vous présenter tout d'abord des cas d'études, les impacts généraux sur le milieu, puis les impacts plus particulièrement sur sa faune et sa flore. Nous avons surtout utilisé des rapports du Sétra<sup>4</sup>, du gouvernement canadien<sup>12</sup> et des articles scientifiques récents.<sup>18, 20</sup>

#### - Impacts sur le milieu aquatique

##### ◆ Cas d'étude

Au New Hampshire, le ministère des transports utilise les sels de voirie sur l'autoroute I93. Cette route traverse deux sous bassins qui alimentent le lac Mirror et un nouveau quartier, créé récemment, qui est aussi une source de pollution des sels de voirie. Le débit d'eau provenant des deux bassins fournit trois fois plus de sels au lac que ce qu'il contient. La concentration en sel dans le lac ne cesse d'augmenter. Les concentrations en chlorure, de l'ordre de 130 mg/L en 1990, ont dépassé une concentration de 230 mg/L. Dans l'immédiat la pollution n'est pas considérée comme toxique mais des écosystèmes sont déjà touchés, par exemple les diatomées et les espèces sensibles aux variations de salinité.<sup>18</sup>

##### ◆ Eau

<sup>4</sup>Deux phénomènes influencent la biodiversité aquatique : la régulation osmotique des organismes et la stratification des eaux lacustres.

- La régulation osmotique est une régulation ionique de l'organisme afin qu'il conserve son équilibre intracellulaire en dépit des contraintes du milieu extérieur. Dans notre cas le milieu est enrichi en ions, comme nous l'avons vu précédemment, et l'ion sodium provoque la déshydratation des cellules. Ce phénomène peut entraîner la mort des organismes.

- La stratification des eaux lacustres est en fait une accentuation de la stratification thermique. Dans tout milieu lacustre en zone tempérée, il existe une stratification thermique variable en fonction des saisons, les masses d'eaux chaudes sont en surface, les froides en profondeur. La densité de l'eau salée est supérieure à celle de l'eau douce, l'eau salée sera donc en profondeur et l'eau douce en surface. En présence de ces doses anormalement élevées de chlorure, cette stratification thermique est bouleversée. Ceci entraînera des conditions anoxiques en profondeur et une perte de nutriment en surface. Tout ceci favorisera bien sûr la baisse de la biodiversité dans ces milieux.

Pour information<sup>4</sup>, « le code pratique de la gestion environnementale des sels de voirie » définit que 5% des espèces subiront des effets néfastes à une concentration en chlorure de 210mg/L, et 10% des espèces pour une concentration de 240mg/L. Ils proposent des seuils de concentration en chlorure de 140 mg/L dans le cas d'une pollution ponctuelle et de 35 mg/L lorsque le milieu est confronté à une pollution chronique, en deçà desquels il n'y aurait pas d'impacts sur les écosystèmes aquatiques.

##### ◆ Flore aquatique

La flore aquatique se trouvant dans les profondeurs du milieu, le milieu étant devenu anoxique, vont subir de fortes pressions. Les espèces possèdent des spectres de tolérance à la salinité, celles qui ont de faibles tolérances seront amenées à disparaître. Des niches écologiques se libérant, d'autres espèces plus adaptées à la salinité se développent. Il y a donc une modification de la biodiversité.

##### ◆ Faune aquatique

Comme nous l'avons vu précédemment l'augmentation de la salinité dans le milieu influe sur l'équilibre osmotique entre cellule vivante et environnement.

Il existe des organismes extrêmement sensibles à une augmentation de la salinité, ils vont être amenés à disparaître même à de faibles augmentations de concentrations. C'est l'exemple des bactéries d'eaux douces.<sup>19</sup>

On remarque une variation dans la structure de la communauté des invertébrés<sup>5</sup>

Dans le cas des amphibiens, on remarque un impact sur la thyroïde qui contrôle le développement de l'espèce. Elle tend alors à disparaître.

Les poissons, quant à eux, sont suffisamment mobiles pour éviter les zones à trop forte concentration de NaCl. Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, une forte salinité réduit et modifie la biodiversité, la chaîne alimentaire du poisson en est donc modifiée. Cela met donc en péril indirectement les poissons. Tout comme les poissons les mammifères sont touchés indirectement par cette pollution : par la chaîne alimentaire.

### - Impacts sur le milieu terrestre

#### ◆ Cas d'études

Une étude a été menée dans l'ouest du Massachusetts, à Kampoosa Bog. C'est une zone marécageuse qui possède une grande biodiversité, des espèces animales et végétales rares. Depuis l'utilisation des sels de voirie une augmentation de la concentration en sodium, chlore, magnésium et calcium dans le milieu est apparue. Une espèce se développe et occupe de plus en plus de niches écologiques : *Phragmites australis* (un roseau géant). On remarque une diminution de la richesse en biodiversité, de la régularité des espèces, une diminution des défenses de certaines espèces (par exemple du graminoid fen), ainsi qu'une modification de la structure des communautés végétales.<sup>20</sup>

#### ◆ Sol

Les zones de sol polluées par les sels de voirie se situent surtout autour des dépôts de sels (s'il y a un ruissellement, pollution le long de celui-ci) et le long des routes épandues (surtout si le sol est mal drainé).

Voici les principaux impacts physico-chimiques des sels de voirie sur les sols<sup>3</sup>: la stabilité structurale, la dispersion, la perméabilité, le gonflement, l'encroûtement, la conductivité électrique et le potentiel osmotique du sol. On remarque également une perte de cations basiques et une modification de la décomposition.

Pour information, la pédofaune et la végétation ne sont pas atteintes par cette pollution jusqu'à des concentrations de 60mg de Na et 90mg de Cl.

#### ◆ Flore terrestre

L'impact dépend de la sensibilité des espèces et de la pression polluante exercée, on peut séparer les impacts en deux parties : la première à court terme et la seconde à long terme.

##### A court terme

- pression osmotique : Les cellules des végétaux sont entourées d'une membrane. Les éléments du milieu ont tendance à traverser la membrane pour que les concentrations soient les mêmes dans la cellule et dans le milieu. Cela s'appelle la pression osmotique. Cela provoque un dessèchement des cellules.

- Floraison, germination modifiée ou absente : lorsque des particules atmosphériques de sodium et de chlorure se déposent sur les bourgeons, il y a une diminution du nombre de fleurs et de fruits, ainsi qu'au niveau de feuille (brûlures) et racines. Par exemple le conifère, le sel l'assèche et produit un déficit hydrique qui peut l'entraîner jusqu'à la mort. - Mort des espèces sensibles au surplus de salinité

A long terme :

- distribution des éléments dans le végétal : le sodium se fixe dans les parties basses de l'arbre, le chlore aux extrémités des feuilles, les ions sont stockés dans les parties ligneuses. Les parties ligneuses gardent ces ions pendant la phase inactive (hiver) et les distribuent lors de la phase active (fin de l'hiver). L'impact a donc lieu pendant la croissance de l'arbre, à la fin de l'hiver. De plus une augmentation en sodium dans un sol induit une baisse d'absorption de  $K^+$ . Le potassium étant essentiel dans la croissance des végétaux, on remarque des baisses de croissances
- Diminution des défenses : le stress créé par des pollutions chroniques réduit la capacité de défense des végétaux. Ils sont alors plus sensibles aux maladies, au froid, aux insectes.
- Une nouvelle biodiversité : les espèces halophiles se développent.

#### ◆ Faune terrestre

L'un des principaux impacts des sels de voirie sur la faune terrestre concerne la grande faune et l'avifaune. En effet, en hiver, ces animaux sont en carence de certains éléments dont le chlorure, c'est pourquoi ils sont attirés vers les routes, et peuvent heurter les véhicules.

Plusieurs chercheurs ont étudié plus particulièrement l'avifaune et décèlent des troubles du comportement après ingestion de sels de voirie, d'après Martineau et Lair (1995)<sup>19</sup> les oiseaux semblent faibles et lents, d'après Trainer et Karstad (1960)<sup>19</sup> les oiseaux manifestent des signes de dépression, de tremblements, de torticolis, de rétropulsion et de paralysie partielle. Ce qui est sûr c'est qu'ils sont moins enclins à éviter les véhicules.

Au niveau toxicologique, on remarque que chez les mammifères ingérant le sel il peut apparaître des inflammations muqueuses de l'estomac. Cela concerne aussi bien un chevreuil en campagne ou un chien en ville. Soit en « léchant » directement le sel sur les routes, soit en se léchant les pattes après avoir été en contact avec des sels de voirie. Au niveau de l'avifaune, Brownlee (2000)<sup>4</sup> remarque que l'aire de distribution des roselins (oiseaux migrateurs du Canada) se rapproche autour des réseaux routiers bénéficiant de l'épandage.

Au niveau de la petite faune, on remarque une sensibilité de certains vers comme les vers de terre car ils sont adaptés à une humidité plutôt élevée, la présence de sel diminuant fortement l'humidité et perturbant ainsi ces organismes.

Au niveau de la microfaune, on remarque une modification de l'activité bactérienne qui a une répercussion directe sur le cycle de l'azote.

#### ◆ Homme

Les sels de voirie ont un impact sur la corrosion des véhicules.

#### - Impacts sur l'atmosphère

#### ◆ Cas d'étude

Cet article fait part d'un phénomène de brume sèche à Montréal qui a persisté ? jours. Il fait état d'une brume différente de celles d'été, une brume qui ne disparaît pas au soleil.

Cette brume est composée de trois principaux éléments : particules émises par les poêles à bois, sel des routes (nébulisation), particules des moteurs à diesel. Avec une concentration de 100 ppm alors que la limite acceptable est de 50 ppm, cette pollution représente un réel danger pour l'Homme et l'environnement. Ce serait dû à une augmentation de l'utilisation des poêles en milieu urbain, à des non-respects de normes sur les moteurs et poêles non conformes (norme EPA). Au niveau des sels de déglacages, on propose de nettoyer les routes. Ce qui les introduirait plus rapidement dans l'environnement et ils n'auraient plus leur utilité sur les routes.<sup>16</sup>

#### ◆ Air

Peu d'études ont été faites à ce jour, on s'intéresse plus à la qualité des eaux et du sol qu'à celle de l'air. Cependant on peut dire qu'il y a dispersion atmosphérique de sodium et de chlorure le long des routes durant la période d'épandage hivernal. Il est possible qu'il se couple avec d'autres éléments et forme des nuages toxiques.

### 3. Prise de conscience de la pollution et pistes d'actions.

#### 3. 1. Solutions et alternatives

Après avoir énuméré les différentes pollutions que les sels de voiries représentaient, nous allons maintenant nous intéresser à la prise de conscience que cette pollution a engendré et les pratiques de gestion des sels de voiries possibles. Avant de nous pencher sur les différentes alternatives envisageables au salage des routes, voyons tout d'abord les solutions et les normes existantes pour réduire l'impact de ces sels de voirie par une meilleure gestion de son utilisation.

En premier lieu, nous pouvons citer quelques pistes d'action émises pour diminuer les quantités de sels de voirie épandues, et donc leur impact environnemental.

Tout d'abord, nous avons vu le chlorure de calcium s'avérer le plus efficace comme agent de déglacage des chaussées mais qu'il était, par son coût, nettement moins utilisé que le chlorure de sodium qui est près de 20 fois moins cher.<sup>21</sup> Cependant, une solution consiste au pré-mouillage des cristaux de chlorures de sodium par une saumure de  $\text{CaCl}_2$ . Cette technique permet au produit de se diluer plus rapidement à la couche de verglas et donc de limiter les quantités de sel requises.<sup>3</sup>

Le dépassement des doses de sel nécessaires pour le déglacage des chaussées constitue, en plus d'un impact plus élevé sur l'environnement, un gaspillage de ces produits. En effet, la température eutectique de chaque chlorure est caractérisée par une concentration de sel en solution bien spécifique. Ainsi, l'usage de trop de sel diminue l'efficacité de la fonte par action chimique.

En plus de ces quantités à respecter, il convient d'appliquer le bon type d'épandage en fonction du verglas à traiter, ou à prévenir. Nous avons vu que l'application d'une saumure au lieu de sel solide nécessitait une moindre quantité de sel par mètre carré. Cette technique permet une fonte plus rapide des dépôts de givre mais s'avérera moins efficace pour traiter des verglas plus épais. Ainsi, une étude du phénomène à traiter peut permettre de diminuer les doses de sel employées.

Pour un meilleur contrôle des quantités de sel épandues, plusieurs techniques ont vu le jour. L'appareil DORSA (Dispositif d'Optimisation et de Réglage des Saleuses), permet de maîtriser les quantités de fondant déversées sur la chaussée par la pesée en continu du sel de déglacage épandu.<sup>22</sup>



Figure 3. Appareil DORSA

Certaines mesures peuvent être prises pour la diminution de la pollution par les sels de voirie sans faire intervenir les quantités de sel utilisées.

Tout d'abord, il convient, pour réduire les pertes de sels lors du stockage des produits, de diminuer les dépôts de voirie non couverts et de bâcher les stocks durant le transport des sels. Cette solution permet, en plus de diminuer les quantités de sels rejetées dans l'environnement, de réduire les coûts liés aux pertes. Par ailleurs, Certaines installations peuvent être endommagées et ne pas présenter une étanchéité suffisante.<sup>23</sup> Dans ce cas, il s'avère généralement plus coûteux d'effectuer les réparations que de laisser une proportion des produits se volatiliser.

De plus, les eaux de drainage dans les entrepôts de sels de voirie peuvent, au contact des stocks de produit, emporter une partie de ces dépôts. On préférera donc les rediriger à l'écart de ces aires d'entreposage. L'eau destinée au lavage des véhicules, chargée en sel, doit elle aussi être traitée de façon adéquate, tout comme les eaux de drainage déjà chargées en sel.<sup>23</sup>

Les transports de sel de voirie seront effectués préférentiellement par beau temps, pour éviter une fois encore que les produits ne soient dilués et emportés par la pluie.<sup>23</sup>

Enfin, il conviendrait d'identifier les zones les plus vulnérables aux sels de voirie afin d'éviter l'installation d'aires de stockage, et dans une moindre mesure, le salage des routes à leurs environs. Ces précautions prennent tout leur sens dans les régions alpines notamment, où une utilisation importante de sel de voirie due au climat continental se voit généralement associée à la proximité de réservoirs d'eaux douces.

L'application d'abrasif n'est une technique alternative aux sels de déglacage que dans une certaine mesure. En effet, le déversement de sable afin d'augmenter l'adhérence de la chaussée est, dans la majorité des cas, couplé à l'ajout de chlorures permettant de coller le sable sur la chaussée. La concentration de sel dans ces mélanges abrasifs ne devra par ailleurs pas dépasser une proportion de 2 ou 5%, au delà de laquelle l'ajout de sel constituerait une perte.

Est-il préférable de sabler au lieu de saler ? Même s'il est vrai que les quantités de sel déversées sont moins élevées en traitement de sablage, la silice rejetée dans l'environnement peut présenter une autre pollution, toute aussi dangereuse. A ce sujet, une étude réalisée en Suisse en 1997 a démontré qu'il valait mieux saler en respectant les doses réglementées plutôt que de gravilloner.

Une expérimentation de cette meilleure gestion des sels de voirie et l'usage de nouvelles technologies a été effectuée au Canada en 2005, notamment dans l'identification des zones vulnérables à ces substances. Les résultats dénotent une réduction notable de la quantité de sel de voirie déversée par kilomètre : de 40 tonnes avant l'essai à seulement 5 tonnes (passant de 1200 tonnes pour un réseau de 30 km à 300 tonnes pour 60 km de routes traitées).<sup>24</sup>

### 3. 2. Réglementations

En France, aucune réglementation n'encadre véritablement l'utilisation de fondant routier. Il existe cependant des lois relatives à la qualité des eaux souterraines et de surface, ainsi qu'à la préservation des milieux naturels. Celles-ci peuvent plus ou moins concerner le problème de la pollution par les sels de voirie. Nous avons choisi les deux suivantes :

- ▶ les articles L. 216-6 et L. 432-2 du Code de l'Environnement répriment (sanction pénale) le fait de jeter, déverser ou laisser s'écouler dans les eaux superficielles, souterraines, directement ou indirectement, une ou des substances quelconques dont l'action ou les réactions entraînent, même provisoirement, des effets nuisibles sur la santé ou des dommages

à la flore ou à la faune [...] ou toute autre substance dont l'action ou les réactions ont détruit le poisson ou nuit à sa nutrition, à sa reproduction ou à sa valeur alimentaire [...] ;

- ▶ la loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques a pour objectif de donner des outils à l'administration, aux collectivités territoriales et aux acteurs de l'eau en général pour améliorer la qualité des eaux et atteindre en 2015 les objectifs de bon état écologique fixés par la DCE. Une des applications de cette loi (décret du 29 mars 1993 modifié) prévoit une procédure de déclaration pour toutes les installations rejetant dans le milieu aquatique plus de 1 tonne de sel dissous par jour (cf. rubrique 2.2.4.0 de l'addendum au guide Nomenclature de la loi sur l'eau). Cette démarche permet notamment de vérifier la compatibilité du projet routier avec le Schéma Directeur ou schéma d'aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE ou SAGE) et avec les objectifs de qualité des eaux (les seuils restant à fixer pour le chlorure). Suite à la procédure de déclaration, le Préfet peut également prendre des arrêtés de prescription.

Cette dernière loi fixant la quantité seuil de sel rejeté dans l'environnement par jour à une tonne, la réglementation ne prend pas en compte les sels provenant du salage des routes, ni des pertes dues à leur entreposage.

Notre pays fait figure de mauvais élève en comparaison avec les principaux autres grands utilisateurs de sel de déglacage. En Europe, l'Allemagne, la Suisse, la Suède, la Finlande et la Norvège ont inscrit la réglementation de l'utilisation de fondant routier dans leur code de l'environnement. Au Canada, la prise de conscience de la pollution y est telle que le gouvernement a élaboré une liste des zones les plus vulnérables aux sels de voirie, afin que les acteurs du déglacage puissent facilement identifier les zones à risque environnemental.<sup>4</sup>

Ces réglementations semblent porter leur fruit, entraînant un salage plus intelligent et plus contrôlé. Nous noterons que les quantités totales annuelles de sels de déglacage utilisées en fonction du réseau routier des pays (*Tableau 3*) sont à relativiser, étant donné la proportion plus grande des routes sujettes au gel au Canada, en Suisse et en Suède.

En contrepartie des fondants routiers, aucune réglementation ne limite l'utilisation d'abat poussière à base de chlorure au Canada, ni aux Etats-unis ou en Europe, qui aurait été établie avant 2005.

### 3. 3. La France : un problème mal résolu

L'absence de réglementation entourant l'utilisation des sels de voirie dans notre pays dénote une trop faible prise de conscience de cette pollution. On peut supposer que l'une des raisons du désintéressement de nos politiques pour ce problème est liée à la fonction protectrice des sels de voirie sur la population. De plus, sans entrer dans une étude sociologique, on peut deviner facilement que le terme de «sel» ne présente pas la même connotation négative que d'autres polluants, et que la mise en question de ce problème peut s'avérer plus délicate pour les médias.

De plus, il existe très peu d'expérimentations de nouvelles techniques de bonne gestion des sels de voirie en France. On peut d'ailleurs regretter une très faible information de ce problème, notamment sur internet. En effet, la grande majorité des sites francophones consacrés à la description de cette pollution que nous avons utilisés sont québécois, et de manière globale, canadiens.

## CONCLUSION

Dans ce rapport, nous avons énuméré les différents impacts environnementaux associés à chaque type de sels de voirie. Ces derniers présentant des compositions spécifiques, ils relâcheront différents éléments dans l'environnement qui représenteront un danger pour différents milieux. En général, on peut distinguer la pollution due aux chlorures à celle associée aux additifs anti-agglomérant (ferrocyanure). Nous ne nous sommes cependant pas beaucoup penchés sur les impacts des éléments traces et insolubles qui peuvent être présents dans ces produits, à des proportions très différentes suivant l'origine du sel.

Pour lutter contre cette pollution, des normes et des réglementations ont vu le jour dans les différents pays concernés. Certains de ces états, comme le Canada, en plus d'avoir fixé des doses limites d'épandage, ont effectué une cartographie des zones les plus vulnérables aux sels de voirie, pour une meilleure répartition des pratiques de déglacage.

En France, ce problème n'est que très peu soulevé. Etant donné qu'aucune réglementation ne traite réellement de l'utilisation des sels de voirie et que la toxicité de ces produits n'est pas inscrite dans nos lois, très peu d'études in-situ ont été effectuées pour quantifier l'impact écologique de ces substances sur notre territoire. Il ne semble pas concevable que les institutions françaises ne suivent pas avec plus d'intérêt les enjeux environnementaux que ce problème suscite.

## Bibliographie

1. LE FIGARO, [2010/routes: moins de 4000 morts.](#) (01/2011)
2. International Road Traffic and Accident Database.
3. ENVIRONNEMENT CANADA & SANTE CANADA, [Liste des substances d'intérêt prioritaire – rapport d'évaluation : Sels de Voirie.](#) *Loi canadienne sur la protection de l'environnement* (1999)
4. SETRA, [L'impact des fondants routiers : état des connaissances et pistes d'actions.](#) *Note d'information de Sétra.* (mars 2011)
5. ENVIRONNEMENT CANADA, [Meilleures pratiques pour l'utilisation et l'entreposage des abat-poussières au chlore.](#) (2007)
6. M.L. BESTER & E.O. FRIND & J.W. MOLSON & D.L. RUDOLPH, [Numerical Investigation of Road Salt Impact on an Urban Wellfield.](#) *Ground Water* (2006)
7. ASSELVIA, [Utilisation des fondants.](#) *Association pour le sel au service de la viabilité hivernale.* (2009)
8. JEAN LIVET, & ETHEL JACQUOT, [Trente ans de démarches scientifiques, techniques et organisationnelles visant à répondre aux attentes sociétales en maîtrisant l'usage des fondants routiers.](#) *CETE Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement.*
9. SYNDICAT UNITAIRE DES PERSONNELS DE L'ÉQUIPEMENT FSU, [Consommation fondant routier - saison hivernale 2010-2011.](#) (2011)
10. ENVIRONNEMENT CANADA, [Profilé d'abat-poussière à base de chlorure au Canada. Groupe de travail sur les sels de voirie.](#) (2005)
11. PIERRE-OLIVIER LAUSECKER, [Les impacts des fondants routiers sur les hydrosystèmes.](#) *CETE Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement.*
12. C. COSANDEY, [Ruissellement.](#) Rapport du CNRS.
13. 13. J.B. ARNOLD, G. WALL, N. MOORE, C.S. BALDWIN, I.J. SHELTON, L'érosion du sol - Causes et Effets. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires Rurales d'Ontario. (1989)
14. MC BEAN. E & S. AL-NASSRI, Migration pattern of de-icing salts from roads. *J. Environ. Manage.* (1987)
15. RUSHTON, Données au sujet des entrepôts de sel de Bible Hill, Saulnierville et Oxford. Environnement Canada (1999)

16. LOUIS-GILLES FRANCOEUR, [Bois de chauffage, sel de déglacement et moteurs au banc des accusés](#). Article du journal québécois Le Devoir (02/2005)
17. U.S.EPA, Water quality research, Environmental impact of highway deicing. U.S EPA Edison Water Quality Laboratory (1971)
18. GENE E. LIKENS & DONALD C. BUSO, Salinization of Mirror Lake by Road Salt. *Water Air Soil pollutant*. (2009)
19. PATRICK CHARBONNEAU, Sels de voirie: une utilisation nécessaire, mais lourde de conséquences. *Le Naturaliste Canadien*, Vol 130 N°1 (2006)
20. JULIE A. RICHBURG & WILLIAM A. PATTERSON & FRANK LOWENSTEIN, Effects of Road Salt and Phragmites Australis invasion on the Vegetation of a western Massachusetts calcareous Lake-basin-fen. *WETLANDS The Society of Wetland Scientists*. (2001)
21. JONHATAN PARIENTE, [Sur les routes : de la neige, de la glace... et du sel](#). Article du journal français *Le Monde* (01/2010)
22. CETE NORMANDIE CENTRE. [Dispositif d'Optimisation et de Réglage des SAleuses DORSA](#). (10/2005)
23. ATC-TAC. [Conception et exploitation des centres d'entretien des routes](#). *Synthèse des meilleures pratiques de gestion des sels de voirie*. (09/2003)
24. ENVIRONNEMENT CANADA, [Bulletin - novembre 2005](#). (11/2005)