Phytotoxicité de produits alternatifs au sel de déneigement

Claire DELORT - Agathe DUTT - Adrien KOCH - Charles LAVEAU - Colombine LESAGE - Jérémy LEROY - Léonard PORTHEAULT - Thomas SCHMITT - Florian SILLY

Le maintien de la viabilité hivernale urbaine dépend de l'usage de grandes quantités de sel de déneigement. Ce sel a un impact néfaste sur les végétaux de bord de route.
C'est pourquoi la CUGN a réalisé un partenariat avec l'ENSAIA afin de tester la phytotoxicité de produits alternatifs au sel de déneigement.

Des produits alternatifs : une solution plus écologique?

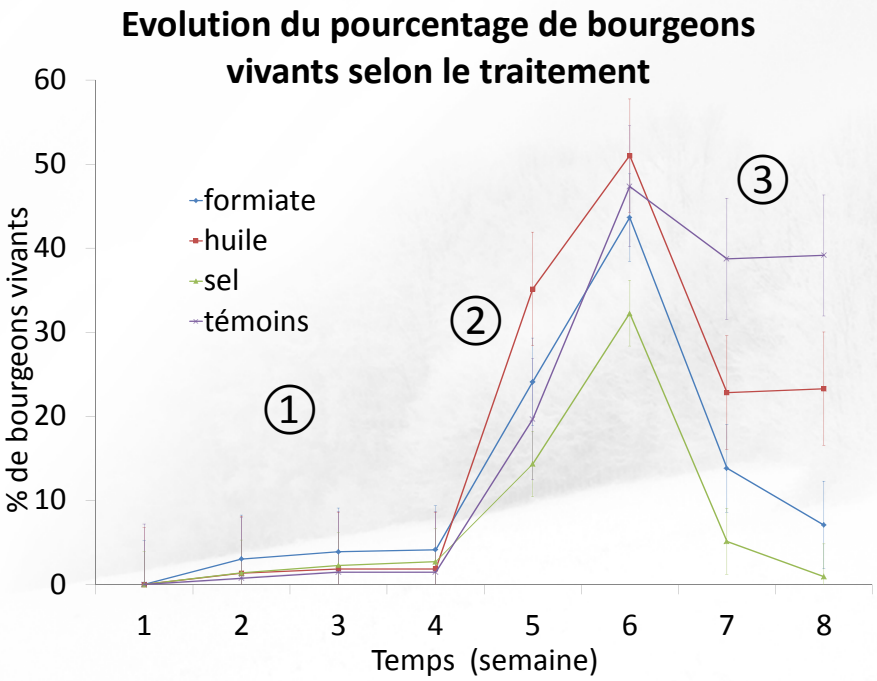
Le **formiate de potassium** (HCOOK) et **Estorob Bio** (dérivé de l'huile de colza) **:** produits **biodégradables** utilisés comme produits de **déneigement et antigel** (aéroport).

Produits	Prix par rapport au sel
Formiate de potassium	12 fois plus cher
Estorob Bio	20 fois plus cher

Ces produits alternatifs « biodégradables » sont-ils réellement moins néfastes pour l'environnement?

Protocole expérimental :

- Culture sous serre pendant 8 semaines (un arrosage d'un litre de solution par semaine)
- Trois essences d'arbres (bouleau, charme, érable)
- 4 modalités de traitement (eau, NaCl : 36 g/L, formiate de potassium : 60,1 g/L, Estorob bio : 71 g/L)



Premiers résultats

Paramètres suivis :

- Vitesse de débourrement
- Présence d'adventices
- pH et conductivité des solutions de percolation
- Vitesse d'infiltration
- Stabilité des agrégats

① Phase de latence

② Débourrement

Le sel réduit le débourrement

③ Nécrose des bourgeons

Impact plus marqué pour le sel et le formiate

Tous les produits ont un impact négatif sur le développement des trois essences d'arbre testées.
L'huile de Colza présente un impact plus limité. Des analyses complémentaires permettront de déterminer si ce produit pourrait être une alternative au sel de déneigement.

LEGLIZE Pierre – SIRGUEY Catherine

La communauté du Grand Nancy représentée par GROSS Christophe

Produits alternatifs au sel de déneigement

Réalisé par :
Claire Delort, Agathe Dutt, Adrien Koch, Charles Laveau, Colombine Lesage, Leonard Portheault, Thomas Schmitt, Florian Silly

Tuteur :
Pierre Leglize et Catherine Sirguey

Année : 2013-2014

Résumé

Le maintien de la viabilité hivernale urbaine est permis grâce à l'usage de grandes quantités de sel de déneigement. Cependant, ce sel a un impact néfaste sur les végétaux de bord de route. C'est pourquoi la CUGN (Communauté Urbaine du Grand Nancy), chargée de l'entretien du parc arboré, tente de trouver des solutions alternatives au sel de déneigement.

Ainsi, la CUGN a réalisé un partenariat avec l'ENSAIA (Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires) afin de tester la phytotoxicité des produits alternatifs au sel de déneigement : l'Estorob Bio D-Icer à base d'huile de colza et le Viaform Liquid à base de formiate de potassium.

Une étude bibliographique et des premiers tests ont été menés par des étudiants de l'ENSAIA afin d'évaluer les effets de la phytotoxicité de ces deux produits.

Table des matières

Résumé 2

Table des matières ..... 3**Erreur ! Signet non défini.**

1. Impact du sel de déneigement sur le sol et la partie racinaire des plantes 4
2. Impact du sel de déneigement sur les végétaux 8
3. Impact du sel de déneigement sur les arbres 13
5. Partie Protocole Expérimental 25
6. D'autres produits chimiques alternatifs au sel 28
7. Les différentes techniques physiques de déneigement 33
8. Les différentes politiques de déneigement appliquées par des agglomérations 38

Charles Laveau

1. Impact du sel de déneigement sur le sol et la partie racinaire des plantes

Introduction

Le dynamisme de l'économie française et mondiale repose en partie sur sa puissance d'échange, c'est-à-dire sur ses flux économiques, physiques et matériels.
Cependant, en période hivernale, ces flux peuvent être entravés par les conditions climatiques. En effet, la neige qui recouvre les réseaux routiers perturbe les transports de marchandise mais également toute les activités nécessitant une certaine mobilité. De plus, l'enneigement des sols représente un véritable danger pour les citoyens.
De nombreuses techniques sont alors mises en place pour éviter tout risque et tout dysfonctionnement économique, mais une est particulièrement utilisée : le salage des routes.

Cependant, l'épandage massif de sel sur les routes peut avoir un impact négatif sur l'écosystème, et plus particulièrement sur le sol et les plantes.
Dans une première partie, nous verrons l'impact du sel sur les caractéristiques physico-chimique du sol, puis les perturbations qu'il provoque sur le système racinaire des plantes. Enfin, nous verrons comment diagnostiquer un stress salin.

1.1. Déstabilisation du complexe argilo-humique par le sel et modification des sols:

Le sol représente la couche superficielle de la croûte terrestre, résultant de la transformation de la roche mère, enrichie par des apports organiques [1]. Le mélange de minéraux argileux et d'humus forme le complexe argilo-humique(CAH). Ces deux éléments étant chargés éléctronégativement, leurs complexations se réalisent grâce à des cations, par exemple grâce à des ponts calciques et magnésiques.

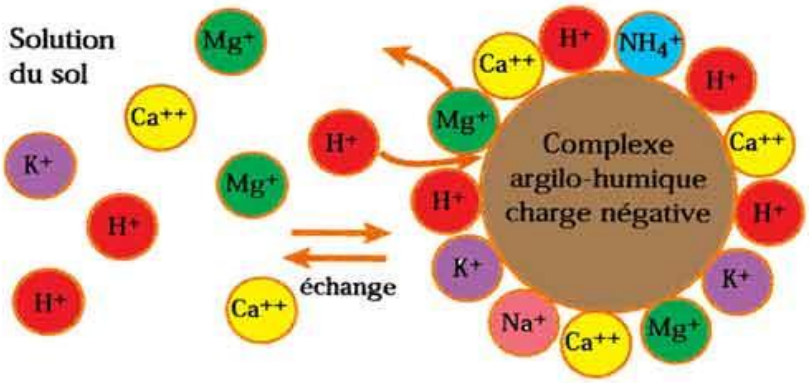


Figure n°1 : Représentation du complexe argilo-humique et du phénomène d'absorption, d'après [2]

D'autres cations peuvent également assurer l'électroneutralité du CAH, ceux-ci pouvant être polyvalents (Al^{3+}, Fe^{2+}/Fe^{3+}) ou monovalents (Na^{+}, K^{+}, NH^{4+}, H^{+}). Les échanges d'ions au niveau du complexe argilo humique définissent la notion d'absorption.

Lors des opérations de salage du réseau, de grandes quantités de sodium se retrouvent dans le sol. Le calcium et le magnésium (ions divalents), étant alors remplacés par des ions monovalents (Na^+ essentiellement), le CAH se déstabilise alors (ce n'est pas le cas avec le K^+).

Le remplacement des ions Ca^{2+} par des ions Na^+ entraîne des phénomènes de dispersion et de gonflement des argiles. En effet, comme nous pouvons l'observer sur la figure n°2, lors du remplacement du calcium par un ion monovalent tel que le sodium, les plans anioniques constituants les argiles s'éloignent, par la diminution du nombre de liaisons et des molécules d'eau peuvent alors s'y insérer.

L'augmentation de la teneur en ion sodium à la surface du CAH provoque donc une non floculation et une dispersion des argiles, modifiant les caractéristiques du sol : diminution de la perméabilité du sol, diminution de la circulation de l'eau et de l'air, … Ceci défavorisant grandement le développement du végétal.

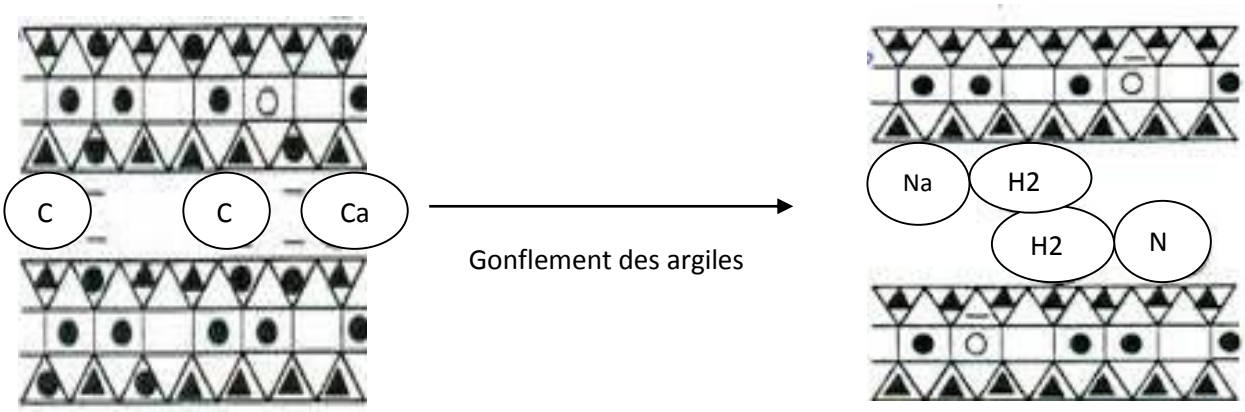


Figure n°2 : Schéma du gonflement des argiles d'après [3]

De plus, l'augmentation du taux de sodium dans le sol conduit à l'augmentation de son pH qui peut atteindre 9, c'est l'alcalinisation. Ce phénomène est dû à la formation de carbonates de sodium, d'après la réaction entre les ions Na^+ et les ions CO_3^{2-}. C'est un des processus de dégradation des sols [4].

La désorption du calcium provoque également sa précipitation (phénomène identique pour le magnésium) en $CaCO_3$ (calcite), appauvrissant le sol en ces éléments nutritifs.

L'épandage de sel, lors de la période hivernale a donc un très grand impact sur la composition physico-chimique du sol, pouvant induire des perturbations de l'écosystème.

Quel sont alors les conséquences sur les végétaux ?

1.2. Potentiel Osmotique et absorption racinaire:

L'absorption racinaire repose sur une différence de potentiel osmotique ($\Delta\pi$) entre le sol et les cellules pilifères de la racine. En effet, par l'assimilation d'anion (NO_3^-, PO_4^{2-}, ..), la plante abaisse le potentiel osmotique de ses tissus et l'eau y pénètre spontanément (l'eau se déplaçant des potentiels les plus faibles vers les plus élevés).

$$\pi = RT[\text{Soluté}]$$

R : constante des gaz parfaits

T : Température

Equation 1 : équation du potentiel osmotique

Lors d'un épandage de sel, le sol se charge en deux ions, le Chlorure (Cl^-) et le Sodium (Na^+), augmentant alors fortement son potentiel osmotique. La différence de potentiel osmotique entre les deux systèmes se voit alors réduit.

La première difficulté d'une plante en milieu salin est donc d'assurer son apport en eau.
Pour cela, il faut que la plante puisse ajuster la pression osmotique de ses tissus par rapport à la pression osmotique du sol, c'est l'épictèse. Cela permet à la plante d'assurer une hypertonie constante permettant l'absorption de l'eau.
Certaines plantes, dites halophytes ont une plus grande capacité à réaliser ce phénomène. Ce phénomène est associé à l'absorption de sel, qui peut cependant, à forte concentration nuire au fonctionnement cellulaire (dénaturation des enzymes, perturbation membranaire, …).
Le sel a donc deux effets sur le système racinaire :

- diminution de la différence de potentiel osmotique entre le sol et les cellules pilifères induisant une diminution du flux d'eau rentrant dans les cellules entrainant également un appauvrissement de l'importation de sels minéraux (transportés par dilution).
- dysfonctionnement du métabolisme cellulaire

Quels sont les symptômes d'une intoxication sur les végétaux et quels en sont les moyens curatifs ?

1.3. Diagnostic d'une intoxication saline et cure:

Lors d'une intoxication par le sel, les feuilles passent par différents stades de dégradation : jaunissement, nécrose, dessèchement complet et chute du feuillage. Ces pathologies sont semblables aux effets que cause une sécheresse.

Cependant, ces signes sont complétés par un retard du débourrage, une diminution du nombre de bourgeons, une reprise printanière plus tardive. Tout ceci pouvant aller jusqu'à la mort de l'individu en question. Ces symptômes peuvent apparaitre quelques mois après l'application du produit. [5]
Cependant la variabilité des symptômes et le long délai de détection rendent le diagnostic difficile. La seule solution fiable reste alors l'analyse des fragments du végétal, en déterminant la concentration ionique en sodium.

En cas de pollution saline constatée, les traitements, que ce soit du sol ou des végétaux reste difficile. En effet, le lessivage des sols en milieux urbain s'avère compliqué à mettre en œuvre et le risque d'asphyxie du système racinaire lié à l'engorgement du sol est important.
La taille des arbres intoxiqués peut alors être réalisée mais à des périodes strictes pour que celle-ci soit la plus efficace possible (c'est-à-dire, quand les concentrations en éléments polluants sont les plus élevées dans les partie taillées). [5]

Face aux difficultés de mise en place des moyens curatifs, l'utilisation d'espèces adaptées et l'épandage raisonné semblent être les meilleures solutions. En effet, certaines espèces dites halophiles sont moins sensibles à l'effet du sel et devraient être introduites en priorité sur les terrepleins. En termes de dosage, l'utilisation de 10 à 25g de sel/m^3 semble être la limite tolérée par l'écosystème. [5]

Conclusion :

L'utilisation du sel comme fondant routier permet de rétablir le réseau routier de façon efficace mais en étant très néfaste vis-à-vis de l'environnement. En effet, le sel va induire des modifications physico-chimiques du sol, modifiant les flux racinaires. Il va également avoir des effets

plus globaux sur le végétal.
Les végétaux, ayant une grande place dans le bien-être des citoyens, devront alors être choisi de façon raisonnée, afin que le sel n'impacte pas sur leur développement. Des arbres, dits halophytes (espèces résistantes au sel comme le chêne, le sureau blanc ou le pin mugo), seront utilisées en priorité, alors que les glycophytes (espèces vulnérables au sel) seront déplacés vers des zones non atteintes par les pollutions salines.
Cependant, le problème des sols n'est pas réglé. D'autres produit, alternatif au sel, et potentiellement moins toxiques pourraient alors être utilisés comme fondant routier.

Références

http ://guillaume.calu.pagesperso-orange.fr/vegetal/salt.pdf
[1] Duchaufour P., Introduction à la science du sol, Dunod, 2004
[2] http://sanssac-pc-services.org/plombez-votre-chocolat/contamination.html
[3] http://theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/23048/ch01.html
[4] Étude et Gestion des Sols, 1998. Cl. Cheverry et M. Robert.
[5] http ://www.arbres-caue77.org/medias/files/l-impact-du-sel-sur-les-arbres.pdf

Adrien Koch

2. Impact du sel de déneigement sur les végétaux

Introduction

Les plantes en ville sont agressées par un grand nombre de types de pollution. La pollution est liée à un trafic routier croissant, au piétinement et à la compaction des sols. Elle affecte négativement la croissance des plantes. En hiver, le maintien de la viabilité hivernale est permis par l'usage d'une grande quantité de sels de déneigement. Cette sur utilisation se traduit par une augmentation des teneurs en sel dans les eaux de ruissellement et dans les sols. Ces sels dissouts arrivent également au contact des végétaux (racines et parties aériennes) et entraînent un stress salin créant peu à peu le dépérissement du patrimoine de l'agglomération.

A Nancy, la Communauté Urbaine du Grand Nancy (CUGN) est chargée de l'entretien du parc arboré. Elle recense chaque année des dégâts de plus en plus nombreux du sel sur la végétation. Ainsi, elle se demande s'il n'existe pas des solutions alternatives pour ralentir ce facteur.

Un projet professionnel a vu le jour en partenariat entre la CUGN et l'ENSAIA visant à étudier l'impact de sels de déneigement sur la végétation. Nous nous appliquerons durant ce projet à étudier les effets du chlorure de potassium et de deux produits alternatifs à base d'huile végétale de colza et de formiate de potassium sur de jeunes arbres.

2.1. Le sel de déneigement : un composé toxique

2.1.1. Comportement du chlorure de sodium dans la plante

Chez la majorité des plantes, dites glycophytes, le sel est considéré comme un composé toxique. C'est un cristal formé de chlorure de sodium (NaCl), qui dans l'eau, se dissout et libère ses ions Na^+ et Cl^-. Dans les sols, ces ions vont avoir tendance à remplacer les autres cations échangeables présents sur le complexe argilo-humique comme le calcium (Ca^{2+}), le potassium (K^+) ou le magnésium (Mg^{2+}). Ces cations peuvent être alors lessivés par les eaux de ruissèlement et devenir moins disponibles pour les plantes pouvant ainsi conduire à des carences en ces éléments. Ainsi, une carence en potassium, élément indispensable pour le développement du végétal, pourra entraîner une perturbation des flux de sèves, traduisant une diminution de la vitesse de circulation de la sève phloèmienne. Les photoassimilats s'accumuleront alors dans les feuilles.

La toxicité directe due à cette accumulation excessive d'ions dans les tissus et le déséquilibre nutritionnel engendré par l'excès d'ions sont les deux actions principales du sel sur la plante. Des concentrations en chlorure de sodium trop importantes dans le milieu sont capables d'altérer la nutrition minérale des plantes [1]. Ainsi, un excès d'ions Na^+ dans le végétal limite l'absorption des cations tels que K^+ et Ca^{2+} qui sont indispensables à la croissance. Ces ions vont entrainer une compétition sur les sites de fixation apoplasmique et influeront sur la croissance de la plante [1]

2.1.2. La migration des ions

Le système racinaire absorbe les ions et ils vont migrer dans le végétal par le système vasculaire de la sève brute, appelé le xylème. L'appareil végétal met en place deux étapes membranaires afin de

prélever les éléments minéraux par les racines et de les transférer vers ses parties aériennes. La première étape est l'absorption des ions par les cellules épidermiques dans la rhizosphère. La seconde étape consiste à secréter ces ions dans les vaisseaux du xylème [2].

Le mouvement des ions dans les cellules peut être de trois trajectoires différentes : la voie apoplasmique (continuum des espaces extracellulaires des tissus), la voie symplasmique (continuum des cytoplasmes de toutes les cellules de la racine interconnectés par les plasmodesmes) ou un trajet fixe faisant passer les ions alternativement du compartiment apoplasmique au compartiment symplasmique [2] (Annexe 1).

Les données actuelles sur la relation structure-fonction de la racine indiquent que les ions sodium peuvent emprunter un trajet apoplasmique direct depuis le milieu extérieur jusqu'au xylème à plusieurs niveaux de la racine. Il traduit que les ions sodium ont tendance à stagner dans les racines ou la base du tronc. Les ions chlorure en revanche migrent vers les extrémités des branches et les feuilles. Ces modifications vont entraîner des effets sur la plante au niveau du fonctionnement des feuilles.

2.2. Les effets sur le phénotype

La cuticule, petite membrane imperméable protégeant la surface de la feuille, peut être abîmée par des phénomènes d'éclaboussures provenant des machines à déneiger [3]. Ces microparticules présentes dans les embruns ont un fort pouvoir abrasif. Ils facilitent la pénétration d'ions et de molécules toxiques dans l'organisme végétal. Ils dérèglent également la transpiration. Ce chlorure de sodium, projeté par les véhicules, ou amené par la plante dans ses extrémités apicales, intoxique et amène la plante à avoir des modifications phénotypiques. Le sel attaque les structures des chloroplastes et détruit la chlorophylle.

En cas d'intoxication, les feuilles peuvent passer par différents stades de dégradation. Il est possible d'observer des jaunissements, brûlures nécroses et chloroses progressant de l'apex et des marges en direction du centre du limbe. De même qu'il peut être aperçu un dessèchement complet et une chute du feuillage, des réductions de surface ou un enroulement de feuilles.[5]. Et enfin l'altération ou la mort des bourgeons de l'année. Tous les symptômes vont agir négativement sur le développement de la plante. Ces altérations sont pour la plupart aérienne et abaisseront le rendement photosynthétique du végétal.

Néanmoins, pour assurer un diagnostic fiable de l'origine de la maladie, seule l'analyse en laboratoire des fragments de végétaux, feuilles ou rameaux est valable.

Figure 1: Effet de la concentration en sel sur le développement d'Acer campestre (Rapport 2011)

Les stomates, systèmes présents sur la face intérieure de la feuille, sont les mécanismes permettant les échanges gazeux avec l'atmosphère. Lorsqu'une forte présence en chlorure dans la plante est retrouvée, la capacité de fermeture des stomates est ralentie la journée. Ainsi, ils ne sont plus capable délimiter la transpiration et la perte d'eau. L'organisme végétal est obligé de puiser d'avantage d'eau, ce qui le freine énergiquement pour se développer.

Ces modifications du phénotype ont également des conséquences sur la physiologie de la plante.

2.3. Les effets sur la physiologie

2.3.1. La photosynthèse

En plus du sel de déneigement, les projections contiennent des particules (sables, poussières) qui irritent la partie aérienne de la plante. Cette partie aérienne correspond aux feuilles et branches. Les feuilles endommagées vont partiellement perdre leur fonction photosynthétique. La photosynthèse est un processus bioénergétique permettant aux plantes de synthétiser de la matière organique à partir de l'énergie solaire. Elle produit des sucres indispensables pour le développement des végétaux. La photosynthèse, mécanisme responsable de la transformation du CO_2 atmosphérique en matière organique est sous le contrôle de facteurs abiotiques.

En effet, une forte salinité va être un facteur limitant de la conductance stomatique et à terme de la capacité photosynthétique [4]. La concentration en sel dans la plante est responsable d'un dysfonctionnement d'une ou plusieurs étapes du processus de photosynthèse. On recense la diffusion du CO_2 à travers les stomates, la chaîne de transport des électrons, et les réactions de phosphorylations et de carboxylations. Sous le stress salin, les photons absorbés qui étaient piégés et utilisés rapidement par les centres photochimiques sont ralentis. Ils s'accumulent sur les antennes chlorophylliennes où ils sont dissipés par fluorescence ou chaleur. La diminution du rendement de photosynthèse par le chlorure de sodium est l'un des impacts majeurs sur le ralentissement de croissance et de production de biomasse de la plante.

Le stress salin va avoir aussi un impact au niveau des cellules.

2.3.2. L'osmose

L'osmose est un phénomène de diffusion liquide entre des molécules de solvants traversant une membrane semi-perméable et séparant deux liquides dont les concentrations en produits dissous sont différentes. Cette différence de concentration provoque une variation de pression osmotique engendrant un déplacement du solvant à travers la membrane. Dans les cellules de la plante, les échanges d'ions et de substances de réserves sont permis par ce phénomène. Pour le bon fonctionnement d'un végétal, la concentration en sels doit être inférieure dans le sol que dans la racine. L'eau passe alors du sol vers la racine pour équilibrer les concentrations. En période d'épandage de sel de déneigement, les fortes concentrations en NaCl dans le sol entraînent une augmentation de la force ionique de la solution du sol. La concentration en sels dans le sol devient supérieure à la force ionique présente dans les cellules du végétal. Les échanges ioniques sont amoindris et impactent négativement l'absorption racinaire de l'eau et des éléments nutritifs [5].

Ainsi, les plantes sont appauvries en eau et vont également présenter des carences en éléments minéraux essentiels tel que les ions K^+, Ca^{2+}, SO_4^{2-}, NO_2^-. Ces carences vont compromettre le développement de la plante [2].

2.3.3. L'inactivation des enzymes et protéines

L'accumulation d'ions Na^+ et Cl^- dans les compartiments intracellulaires des végétaux entraîne des carences minérales et de nombreux dysfonctionnement métaboliques. En effet, dans la structure tertiaire d'une enzyme, ce sont les interactions des acides aminés et des molécules d'eau qui l'entourent qui la rende fonctionnelle. La présence trop importante d'ions Na^+ et Cl^- dans les cellules de la plante va déstabiliser ces interactions structurales provoquant une diminution de certaines activités enzymatiques jusqu'à une inactivation de celles-ci. Les protéines ayant besoin d'être activées par la présence de K^+ sur leur site de fixation sont inhibées par la compétition du Na^+.
Par conséquent, l'activité de nombreuses enzymes et protéines est inhibée par une concentration trop élevé de Na^+ et elle entraîne des dysfonctionnements dans la cellule.
La traduction des ARNt est également affectée par la présence du sodium. Ce mécanisme demande une concentration élevée en K^+ afin que les ARNt se fixent aux ribosomes [2].

Enfin, l'ion Na^+ provoque une série de phénomènes de compétitions avec l'ion K^+ présent dans les membranes. Les transporteurs d'ions K^+ présents dans les membranes cellulaires sont vitaux pour la plante. Ils possèdent un grand nombre de fonctions tels que la synthèse de protéines, l'activation d'enzymes, la stimulation de la photosynthèse et le maintien de la turgescence. Ainsi, cette forte concentration en ion Na^+ inhibera l'activité des transporteurs membranaires et affectera le métabolisme du carbone et de phosphorylation indispensable au développement de la plante [2].

Conclusion

Nancy est une ville où l'hiver est rigoureux et les précipitions neigeuses sont assez importantes. De ce fait, pour que le trafic routier soit maintenu, une grande quantité de sel de déneigement est déposée sur les routes. Cet apport de sel impacte fortement les végétaux présents en bord de route. En effet, les fortes concentrations en NaCl induisent des effets toxiques pour les végétaux. Les projections de sel ont un effet abrasif sur les parois des végétaux ce qui les rend plus sensibles aux maladies. De plus, de fortes concentrations en ions Na^+ et Cl^- ont des conséquences directes sur la physiologie du végétal, en intervenant négativement sur des mécanismes vitaux comme la photosynthèse. Les produits alternatifs testés sont dépourvus de ces ions qui impactent négativement l'organisme du végétal. L'étude portera donc sur l'innocuité de ces produits alternatifs.

Références

[1] HAOUALA F., FERJANI H., EL HADJ S. B. 2007. Effet de la salinité sur la répartition des cations (Na^+, K^+ et Ca^{2+}) et du chlore (Cl^-) dans les parties aériennes et les racines du ray-grass anglais et du chiendent. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* Vol. 11, n°3, p. 235–244.

[2] JABNOUNE, M. 2008. Adaptation des plantes au stress salin : caractérisation de transporteurs de sodium et de potassium de la famille HKT chez le riz. Thèse de doctorat, Montpellier Supagro, Centre International d'Etudes Supérieures en Sciences Agronomiques, 289 p.

[3] HADDAD Y. 2012. Impacts du sel de déneigement sur les arbres. Journée Technique, ArboRencontres : (25ème) L'arbre en condition hivernales – Avon – 02 février. Disponible sur : < http://www.arbres-caue77.org/pages/journees-techniques/arborencontresab/l-arbre-en-conditions-hivernales.html >

[4] RADHOUANE, L. 2009. La photosynthèse du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.) en présence de contrainte hydrique et saline. Journal of Agriculture and Environment for International Development 2009, 103 (3): 185-200.

[5] BRECHIGNAC J., CHAIX-BRYAN A., CROUZET R., DESAEGHER J. , MARI A. 2011. Etude de l'impact des sels de déneigement sur la végétation urbaine du Grand Nancy. Rapport de projet professionnel ENSAIA – Nancy Université, 21 p.

Annexe 1

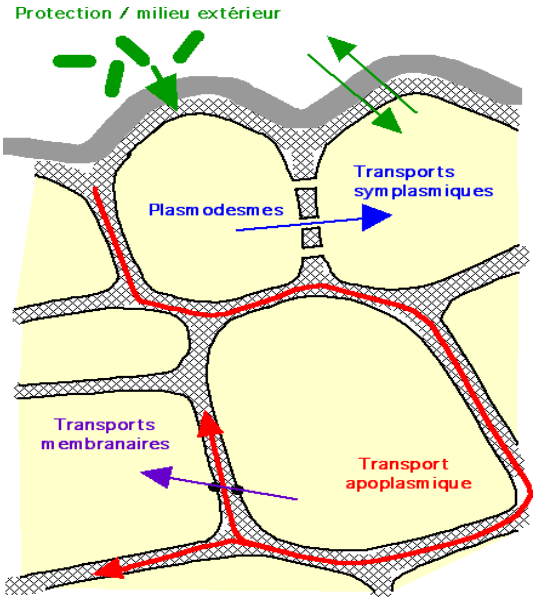


Figure 2: Paroi et communication intercellulaire (Source : http://uel.unisciel.fr)

3.

3. Impact du sel de déneigement sur les arbres

Introduction :

Les arbres en milieu urbain remplissent des fonctions écologiques et thérapeutiques, mais ils peuvent aussi contribuer à notre confort et notre sécurité et jouer un rôle social, esthétique et même économique. Plus précisément, les bienfaits apportés par les végétaux à la vie urbaine peuvent s'apprécier à travers la protection de l'environnement, le bien-être psychologique, la sécurité routière ou encore embellir les villes. [1]

La nature des espèces implantées ainsi que leurs dispositions vont être directement liées aux objectifs attendus. Les arbres ont un rôle environnemental majeur à travers la purification de l'air en générant du dioxygène (Figure 1). De plus, ils permettent la diminution de la température ambiante, ou encore, ils améliorent la structure des sols. Le second rôle important est le bienfait observé sur la santé des habitants en leur permettant de se ressourcer au calme et de diminuer le stress grâce à l'effet de verdure généré par les végétaux. Aussi, un effet thérapeutique peut être observé grâce à la réduction des gaz nocifs, à la diminution de la température lors de chaleurs excessives et à l'interception des rayons du soleil qui sont à l'origine de pathologies.

Cependant, en ville, ces végétaux sont soumis à des contraintes spécifiques comme la pollution, le volume de sol restreint, les dégradations physiques... Parmi elles, les fortes quantités de sel apportées au cours de la saison hivernale ont un impact important sur les arbres. Cependant, les espèces végétales n'ont pas toutes la même réponse vis-à-vis du stress salin. La Communauté Urbaine du Grand Nancy (CUGN) s'occupant de l'ensemble des surfaces arborées est donc confrontée à ce problème de dégradation des arbres par les produits de déneigements. C'est pourquoi, des solutions alternatives à l'épandage de sel durant la saison hivernale sont recherchées.

A travers cette mission, l'un des points de réflexion est porté sur le comportement des différentes espèces ornementales face à l'épandage du sel.

Pour répondre à cette problématique, l'effet du sel sur les arbres sera étudié ainsi que leurs caractéristiques de résistance afin de proposer une implantation raisonnée.

3.1. Les symptômes du sel de déneigement sur les arbres :

Pour la CUGN, les arbres ont un effet bénéfique sur le bien-être de la population, mais en plus de cet aspect, l'aménagement de ces derniers reflète la politique écologique de la ville ainsi que son implication dans l'urbanisme. Cependant, la ville doit aussi gérer la circulation sur des aires bétonnées qui entourent les arbres et qui génèrent de nombreuses contraintes. Durant la saison hivernale, les services techniques optimisent les conditions de circulations, et, pour ce faire, épandent du sel de déneigement.[2].

Or, le sel est un fléau pour la plupart des végétaux. Il est composé de cristaux de chlorure de sodium (NaCl) qui suite à son épandage, va suivre différentes voies pour impacter les arbres (Figure 2). Les véhicules vont générer des projections directes qui vont pouvoir impacter les feuilles, les bourgeons ou encore les écorces. Les cristaux de sel vont alors pénétrer par l'intermédiaire des stomates dans les feuilles et entraîner la destruction de la chlorophylle. Ce phénomène va être à l'origine de nécroses qui vont donner l'aspect du brunissement témoignant du dessèchement et de la

brûlure des tissus. L'altération des feuilles va entraîner un disfonctionnement photosynthétique et donc pénaliser la production de sucres nécessaires à l'ensemble du développement de la plante. Du point de vue de l'écorce, les effets vont être moins visibles mais ils seront plus problématiques sur le long terme. [3]

Lors de la fonte de la neige, l'eau va entraîner les ions Cl^- et Na^+ qui vont s'accumuler dans le sol. Le Na^+ va se lier aux argiles et donc perturber l'assimilation d'autres minéraux par la plante (Figure 3). Pour ce qui est des ions Cl^-, ils vont être directement assimilés par les plantes. La présence de ces ions va entraîner une compétition qui va compliquer l'absorption de l'eau par le système racinaire des végétaux.

La modification des sols va avoir un impact direct sur le développement des arbres. Le manque d'eau va affaiblir les fonctions racinaires, diminuer l'absorption de minéraux nécessaires au développement de la plante, ce qui est très problématique dans le déroulement de son métabolisme de la plante. Ces modifications sont responsables de différents symptômes majeurs qui sont les suivants : [2]

- Réduction de la croissance.
- Augmentation de l'exposition aux ravageurs.
- Jaunissements et nécroses des feuilles.
- Dessèchement et pourritures des végétaux.

Il existe différentes catégories naturelles d'arbres qui peuvent être classées en fonction de leur résistance au sel. Deux grandes catégories peuvent être distinguées : les plantes sensibles au sel et celles qui sont résistantes au sel. Cette propriété peut être exploitée pour comprendre le comportement des arbres face au sel de déneigement.

3.2. La résistance variétale :

Selon les espèces, la variation de l'apparition des symptômes est importante [4]. Certaines espèces sont tolérantes car elles présentent peu de symptômes même à une forte exposition (espèces halophytes vraies) comme le chêne. Par opposition d'autres espèces comme l'érable présentent rapidement des symptômes (Tableau 1).

La CUGN est confrontée à ces contraintes de déneigement tout en optimisant le développement des arbres. L'une des situations les plus problématiques se situe sur un axe principal de l'agglomération Nancéenne : l'avenue Pinchard (Figure 4). Cette avenue comporte deux voies de circulations pour les automobiles ainsi qu'une voie pour le tram. Or ce transport en commun nécessite une circulation continue et donc un déneigement automatique durant les épisodes neigeux. Ces pratiques ont un impact direct sur le développement des arbres qui sont sujets à de fortes concentrations de sels. Or, trois espèces ont été observées : l'érable, le sorbier et le lierre. Le choix de ces trois espèces est stratégique en vue de leur emplacement. Elles ont été implantées le long des axes de circulations, d'où la présence de contraintes vis à vis de l'amplitude de l'arbre qui doit être limitée pour ne pas empiéter sur la route. De plus l'implantation de lierre permet de couvrir le sol est donc de limiter le développement de végétaux non désirés ainsi qu'à augmenter "l'effet vert". Cependant au-delà de ces contraintes, l'aspect de résistance face au sel n'a pas été pris en compte.

C'est pourquoi, dans le tableau suivant est présentée la sensibilité des végétaux présents sur l'avenue Pinchard face au sel :

Tableau 2 : Sensibilité au sel des végétaux implantés sur l'avenue Pinchard à Nancy :

Essence	Sorbier	Érable	Lierre
Tolérance au sel	–	+	++

Très sensible	– – –	– –	–	+	++	+++	Très rustique

Source : [4]

Ce tableau montre le comportement global des espèces utilisées face au sel. Ainsi, le sorbier et l'érable apparaissent comme étant non tolérantes au sel. Seul le lierre, plus rustique, pourrait supporter des conditions salines importantes. Cette contrainte est donc problématique vis-à-vis de l'exposition des végétaux le long de cet axe fortement fréquenté.

3.3. Une optimisation des espèces :

Parmi les espèces implantées sur le site d'étude, seul le lierre présente un caractère de résistance vis à vis du sel épandu. Dès lors, un choix de deux espèces d'arbres substituant le sorbier et l'érable va être proposé.[6].

Au-delà de la contrainte du déneigement, les arbres doivent répondre à des critères bien précis, notamment au niveau du développement du houppier pour ne pas gêner la circulation des véhicules.

Aussi, dans la zone étudiée, l'implantation des arbres se fait dans un volume de terre relativement modéré avec une épaisseur de terre de 30 cm. Cependant un drain permettant l'évacuation des eaux a été mis en place, ce qui augmente le nombre d'espèces envisageables.

Pour s'adapter aux multiples contraintes, une association intéressante regroupe un résineux, le pin Mugo, un feuillu, le sureau blanc ainsi qu'un couvre sol qui est déjà en place : le lierre.

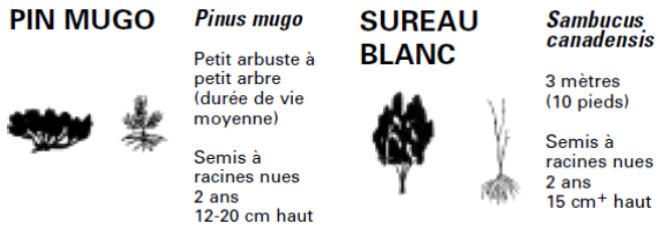


Figure 5 : Association entre un résineux : le Pin Mugo et un feuillu : le Sureau Blanc
Source : [5]

Le pin Mugo est un petit résineux très commun dans le milieu urbain grâce à sa petite taille ainsi que sa résistance au sel. De plus, il est adapté à la sécheresse, paramètre à prendre en compte à cause du faible volume de terre disponible pour son développement.

Le sureau blanc quant à lui est un feuillu qui a un développement relativement limité avec une hauteur maximale de 3 m. En plus de son adaptation au milieu urbain, il a une qualité ornementale intéressante par son esthétique. Comme pour le pin Mugo, le sureau blanc n'a pas besoin d'un grand volume de terre pour se développer.

Conclusion :

Les arbres ornementaux ont une place importante, que ce soit au niveau social ou environnemental. Néanmoins, ces végétaux sont souvent inclus dans des structures telles qu'il faut adapter les arbres aux conditions et à l'espace disponible. Un autre facteur à prendre en compte est le sel utilisé lors du déneigement. Ce sel à un impact direct sur les arbres dont la sensibilité varie en fonction des espèces.

Une situation complexe peut être étudiée à Nancy, où des arbres ont été implantés le long d'un axe de circulation regroupant de multiples contraintes. Les espèces ornementales qui ont été plantés le long de cet axe sont le sorbier, l'érable et le lierre. Néanmoins, deux d'entre eux, le sorbier et l'érable sont sensibles au sel.

De ce fait, une alternative dans les associations est proposée. Du point de vue de la diversification, un résineux, un feuillu et un ligneux sont combinés pour assurer un développement optimal dans ces conditions. Cependant pour éviter le remplacement des arbres présents, d'autres alternatives au sel de déneigements peuvent être employées.

Annexe :

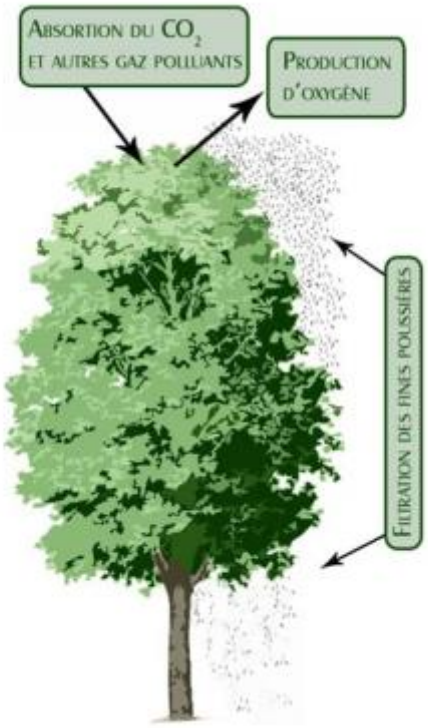


Figure 1 : La purification de l'air par les arbres :
Source : [1]

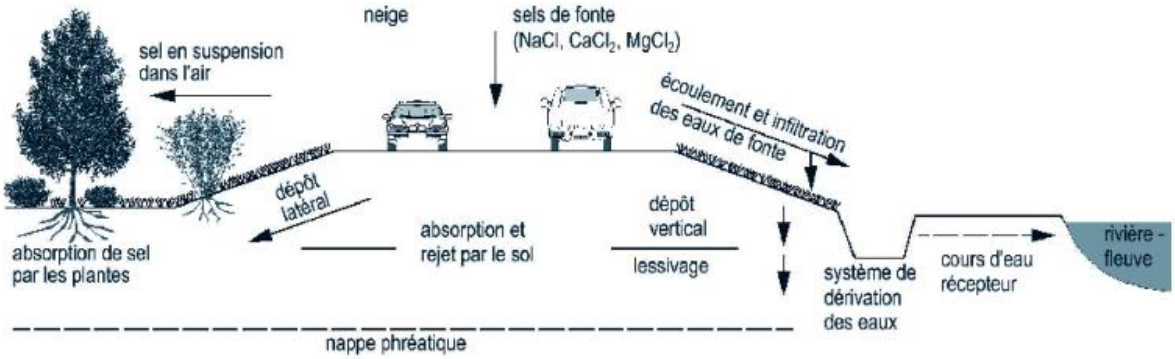


Figure 2 : Cheminement du sel de déneigement dans l'environnement :
Source : [2]

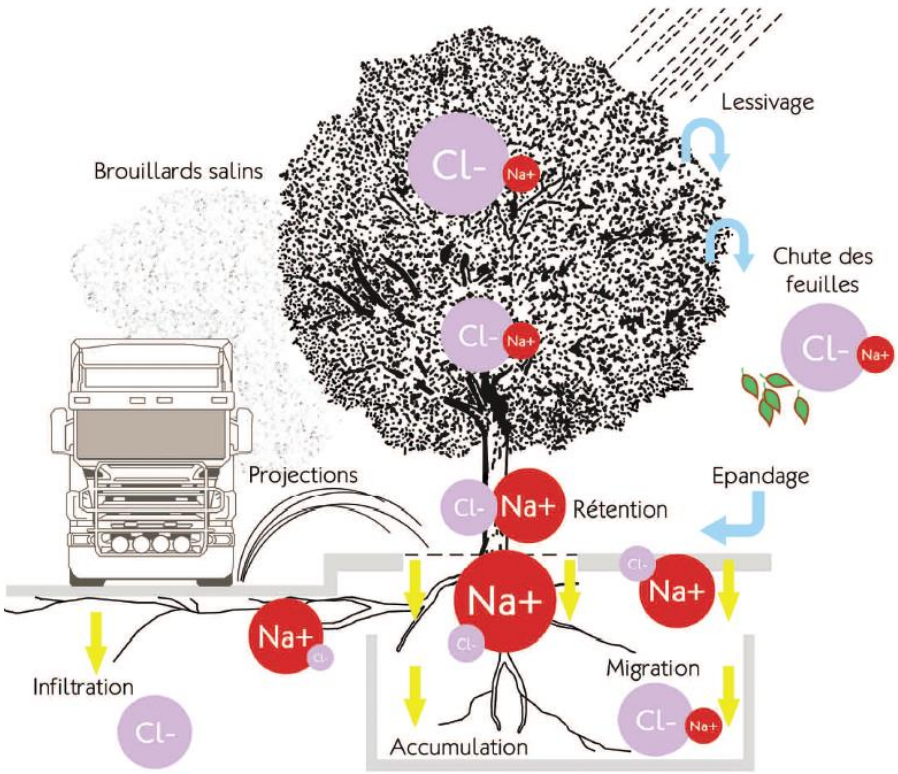


Figure 3 : Le cycle du sel dans les alignements urbains :
Source : [3]

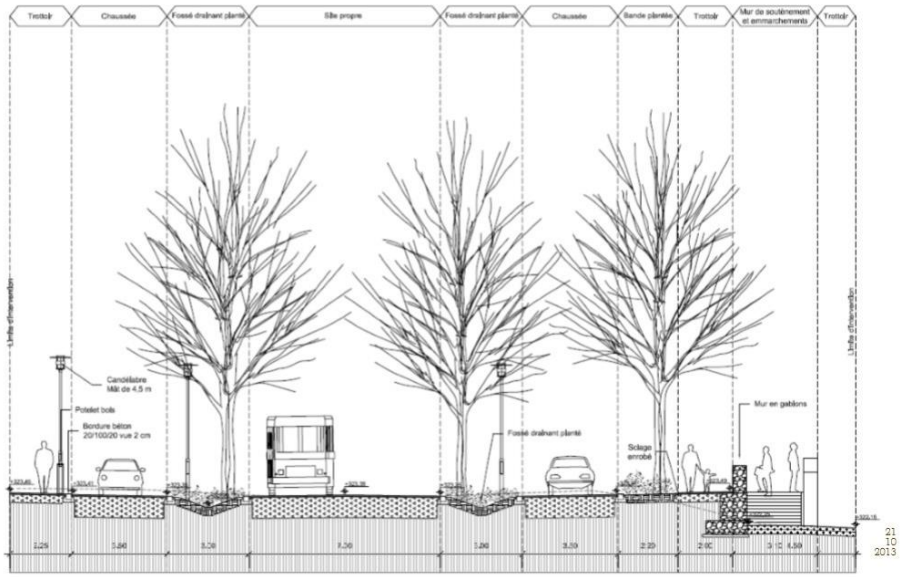


Figure 4 : Coupe transversale de l'avenue Pinchard :
Source : CUGN

Tableau 1 : La sensibilité des arbres face au sel de déneigement :

Vulnerable to Salt		***More Tolerant to Salt***	
Botanical Name	**Common Name**	**Botanical Name**	**Common Name**
Acer rubrum	Red Maple	*Acer platanoides*	Norway Maple
Acer saccharum	Sugar Maple	*Aesculus* spp.	Buckeyes
Albizia julibrissin	Mimosa	*Betula* spp.	Birch
Amelanchier spp.	Serviceberry	*Carya* spp.	Hickories
Carpinus caroliniana	American Hornbeam	*Fraxinus* spp.	Ash
Cornus florida	Dogwood	*Ginkgo biloba*	Ginkgo
Crataegus spp.	Hawthorn	*Gleditsia triancanthos*	Honeylocust
Fagus grandifolia	American Beech	*Juglans nigra*	Black Walnut
Liriodendron tulipifera	Yellow-Poplar	*Juniperus virginiana*	Eastern Redcedar
Lagerstroemia spp.	Crapemyrtle	*Populus* spp.	Cottonwood/Aspens
Magnolia grandiflora	Magnolia	*Prunus* spp.	Cherries
Picea spp.	Spruces (most)	*Quercus* spp.	Oaks (most)
Pinus strobus	Eastern White Pine	*Robinia pseudoacacia*	Black Locust
Pinus sylvestris	Scotch pine	*Taxus* spp.	Yews
Tilia spp.	Lindens	*Ulmus* spp.	Elms
Tsuga canadensis	Eastern Hemlock		

[1] Adapted from Dirr 1976; Johnson & Sucoff 1999; Lumis et al. 1975

Source : [4]

Références :

[1] LESSARD G., BOULFROY E. 2008. Les rôles de l'arbre en ville. Québec : Centre collégial de transfert de technologie en foresterie de Sainte - Foy (CERFO). Disponible sur :
< http://www.crecn.qc.ca/commission/pdf/cifq-arbreenville.pdf >

[2] UNION SUISSE DES SERVICES DES PARCS ET PROMENADES. 2013. Sels de déneigement : effets sur les arbres d'alignement. Dernières connaissances, mesures et recommandations basées sur une large étude bibliographique. 12 p. Disponible sur :
<http://www.vssg.ch/documents/Sel_de_deneigement_effets_sur_les_arbres_d-alignement_2013_F_L.pdf >

[3] HADDAD Y. 2012. Impacts du sel de déneigement sur les arbres. Journée Technique, ArboRencontres : (25ème) L'arbre en condition hivernales – Avon – 02 février. Disponible sur :
<http://www.arbres-caue77.org/pages/journees-techniques/arborencontresab/l-arbre-en-conditions-hivernales.html >

[4] CLATTERBUCK W.K. 2003. SP610 Tree Susceptibility to Salt Damage. The University of Tennessee Agricultural Extension Service, SP 610 - 12M - 7/03 R12-4910-034-003-04, Disponible sur : <http://trace.tennessee.edu/utk_agexfores/72>

[5] MUNCK I. A., BENNETT C. M., CAMILLI K. S., NOWAK R. S. 2010. Long-term impact of de-icing salts on tree health in the Lake Tahoe Basin: Environmental influences and interactions with insects and diseases. Forest Ecology and Management Vol. 260, n°7, p. 1218-1229. Disponible sur :
< http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.015>

Colombine Lesage

4. Alternative chimique à l'épandage de sel de déneigement : étude des produits testés.

Le maintien de la viabilité hivernale nécessite l'épandage de fondant, en particulier de NaCl. Cependant, cette solution est à l'origine de différents problèmes sur les végétaux qui sont soumis à des projections. A l'heure actuelle, il existe différents produits alternatifs tels que les formiates (de sodium ou de potassium) et l'Estorob Bio D-Icer.

4.1. Le formiate de Potassium

Le formiate de potassium, de formule chimique HCOOK, se trouve sous forme liquide à température ambiante (Point de congélation -58°C et Température de décomposition > 167°C).(cf tableau en bas de page).

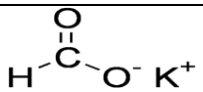
Il est de couleur blanche et complètement soluble dans l'eau et inodore. Le formiate de potassium est utilisé comme antigel, sel de dégivrage écologique des routes et autres applications dégivrantes. Il n'est pas considéré comme persistant, bio-accumulable et toxique (PBT) ou très persistant à fort potentiel de bioaccumulation (vPvB). Il est cependant recommander d'éviter tout contact avec la peau ou les yeux, car il peut être source d'irritation. [1]

Le formiate de Potassium, est actuellement utilisé dans des pays tels que le Canada ou la Finlande, où des études ont été faites sur ses impacts environnementaux et sanitaires.[2]

Le formiate de potassium est biodégradable pour une demande en oxygène minimale. Il crée moins de dommages sur la flore et le sol que le chlorure de sodium bien qu'il soit a priori plus néfaste sur le phytoplancton, les invertébrés et les poissons que celui-ci. [3]

Le coût de ce fondant est environ 20 fois supérieur au coût du chlorure de sodium. Cf figure 2

Propriétés du formiate de Potassium : tableau issu de [1] [4] [5]

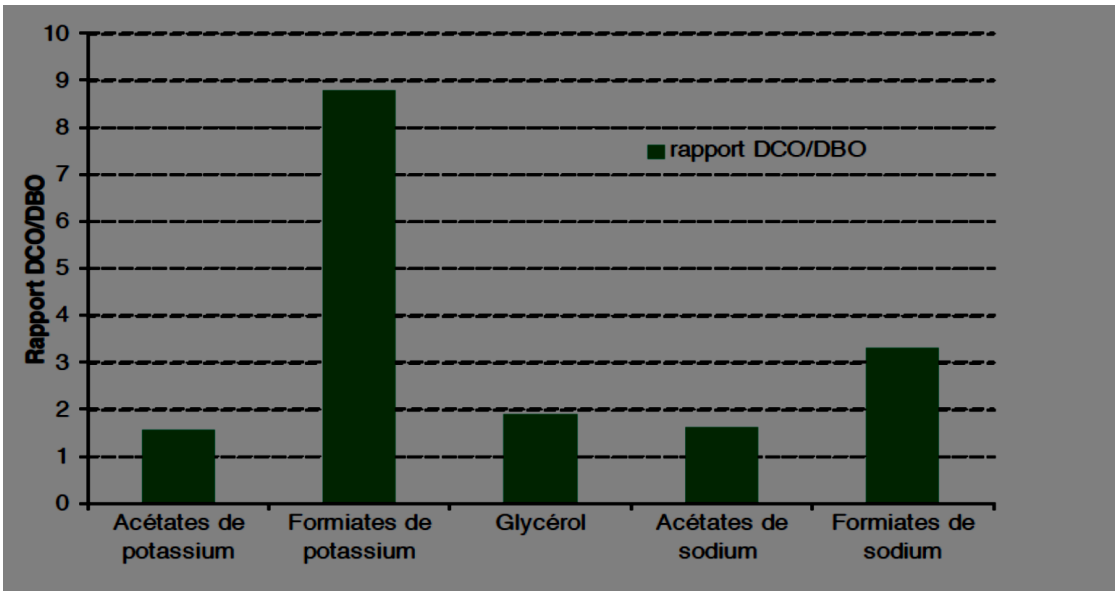
Formule chimique	HCOOK 
Pictogramme	
Densité	1,91
Masse moléculaire	84,12 g/mol
pH optimal	9-11
Viscosité	2,5 mPas (25°C)
Température de fusion	-58°C
Température d'ébullition	>167°C
Point éclair	>100°C
Phrases de sécurité	36 – 37 – 38
Phrases de risque	26 – 37 – 60

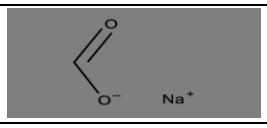
4.2. Formiate de Sodium

Le formiate de sodium, de formule chimique HCOONa, se trouve sous forme solide à température ambiante. On le trouve sous forme de poudre blanche et il est complètement soluble dans l'eau et une faible odeur d'acide formique. Le formiate de potassium est utilisé dans l'industrie de cuir, la synthèse de catalyseurs et d'agents de stabilité, comme un agent réducteur', pour la production d'hydrosulfite de sodium, l'acide oxalique et l'acide formique [6]

Le coût de ce fondant est environ 12 fois supérieur au coût du chlorure de sodium. Cf figure 2

Propriétés du formiate de Sodium :



Formule chimique	HCOONa 
Pictogramme	
Densité	1,92
Masse moléculaire	68 ,02 g/mol
pH optimal	7-8,5
Viscosité	Non applicable
Température de fusion	253°C
Température d'ébullition	411°C
Point éclair	Non applicable

La biodégradabilité des fondants routiers étudiés est mesurée par le rapport DCO/DBO (Demande Chimique en Oxygène/Demande Biologique en Oxygène) qui traduit l'oxydabilité des produits. Ce rapport est exprimé dans la figure 1.

Figure 1: Biodégradabilité de différents fondants routiers. Figure issue de [3]

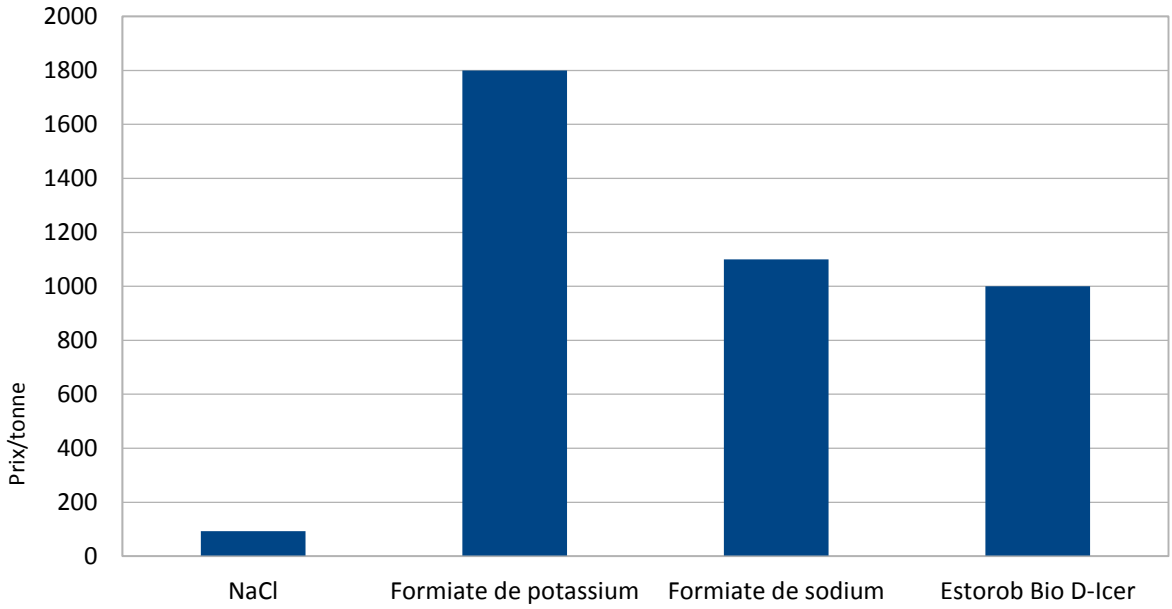


Figure 2 : Prix des différents fondants routiers en comparaison du prix du sel. Figure issue de [3]

4.3. Huile végétale à base de colza : Estorob bio D-icer

Estorob Bio D-Icer est une huile végétale à base de Colza utilisée comme produit de déneigement, principalement dans les aéroports. En effet, c' est un déverglaçant liquide qui évite l'usure prématurée des freins en carbone des avions et qui s'utilise en préventif ou en curatif sur les pistes d'envol et de circulation des aéroports.[7]

Ce produit a été élaboré par la société Novance [8] qui appartient elle-même au groupe Sofiprotéol, l'établissement financier de la filière française des huiles et protéines végétales. Novance estime que son produit issu de la chimie végétale (composition en Glycérine >99.7% [8]) dispose d'atouts sérieux pour venir concurrencer les produits actuellement utilisés pour dégivrer les pistes d'aéroport. [9]

« Estorob Bio D-Icer » est biodégradable. Surtout, il se présente comme « non écotoxique », il est produit à partir de ressources renouvelables (le colza) et enfin, il présente un pH proche de la neutralité.

Au final, ce produit végétal s'avère 7 fois moins corrosif que le formiate de potassium et l'acétate de potassium et est fortement recommandé pour le dégivrage local des installations métalliques ou des équipements électriques.[10] Il permet le dégivrage d'installations dont l'énergie électrique est fournie par le sol (tramways), n'est pas corrosif contre les métaux et freins carbone des avions, permettant ainsi de prolonger la durée de vie des équipements électriques. De plus cette huile n'est pas irritante (pH neutre) et biodégradable (à plus de 95%), à basse température.[10]

Références

[1]http://dtrf.setra.fr/pdf/pj/Dtrf/0005/Dtrf-0005939/DT5939.pdf?openerPage=notice
[2] http://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/environ/etudes/degivdeverg20070109.pdf
[3]http://www.cotita.fr/IMG/pdf/10-Reduct_impact_SH_sur_envt.pdf
[4]http://www.weatherford.com/weatherford/groups/web/documents/weatherfordcorp/wft137413.pdf
http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/294454?lang=fr&region=FR
[5]http://www.cas-registry-number-reports.org/Data-Institute/CAS-World-Consumption-Reports/590-29-4__Potassium-formate.html
[6] http://www.cadilhac.ma/cariboost_files/formiate_20de_20sodium_fds_01122010.pdf
[7]http://www.leparisien.fr/oise-60/l-antigel-vert-coute-cher-a-l-aeroport-18-01-2010-781293.php
[8]http://www.agrobiobase.com/fr/annuaire/bioproduits/maintenance/estorob-bio-d-icer
[9]http://avia.superforum.fr/t286-actualites-news
[10]http://www.oleon.com/deicingfluid.html6.

5. Partie Protocole Expérimental

Le chimiste Michel-Eugène Chevreul définit la démarche expérimentale en 1856 ainsi : *« Un phénomène frappe vos sens ; vous l'observez avec l'intention d'en découvrir la cause, et pour cela, vous en supposez une dont vous cherchez la vérification en instituant une expérience. Le raisonnement suggéré par l'observation des phénomènes institue donc des expériences (…), et ce raisonnement constitue la méthode que j'appelle expérimentale, parce qu'en définitive l'expérience est le contrôle, le critérium de l'exactitude du raisonnement dans la recherche des causes ou de la vérité ».* [1]

La méthode expérimentale est donc une démarche scientifique. Elle consiste à tester, par des expériences répétées, la validité d'une hypothèse en obtenant des données nouvelles, qualitatives ou quantitatives, conformes ou non à l'hypothèse initiale [2]. L'expérience scientifique se distingue de l'expérience empirique : elle exige un protocole conçu à partir d'une hypothèse. Le protocole d'expérimentation a pour rôle de regrouper la description des conditions et du déroulement d'une expérience ou d'un test. La description doit être suffisamment claire afin que l'expérience puisse être reproduite à l'identique. Il doit également faire l'objet d'une analyse critique pour notamment détecter d'éventuels biais. Ainsi, la mise en place d'un protocole expérimental doit suivre des règles strictes et conventionnées.

Comme la démarche expérimentale a pour but de provoquer un phénomène, d'en observer et d'en mesurer les conséquences dans des conditions connues, il faut qu'elle soit l'objet d'une planification très stricte. Le protocole expérimental répond à cette planification.

Les différents éléments de base d'un protocole sont les suivants :

- Définition des buts et des conditions de réalisation de l'expérience ;
- Définition des facteurs dont on désire étudier l'influence, de ses modalités et des combinaisons de ces modalités ;
- Définition des individus (=unités expérimentales) observées ;
- Définitions des observations qui devront être réalisées et des modalités de collecte de ces observations ;
- Manière dont les différentes modalités ou combinaisons de modalités du ou des facteurs sont affectées aux différentes unités expérimentales, ainsi que de leur répartition dans l'espace ou dans le temps. C'est le dispositif expérimental ;
- Informations générales relatives à l'analyse des résultats. [3]

5.1. Buts et conditions de l'expérience

Deux types d'expériences diffèrent : les expériences à objectif simple et à objectifs multiples. Dans le cas d'expériences à objectifs multiples, le but est d'étudier plusieurs variables différentes relatives à une même série d'individus. Dans tous les cas, il est important de réaliser une bibliographie complète sur le sujet de l'expérimentation, ce qui permet d'établir clairement le but de l'expérience [1]. Toutes données et connaissances supplémentaires sur le sujet pourront permettre de mieux

organiser le travail. On peut également effectuer, en plus des mesures de base, des observations complémentaires relatives au déroulement de l'expérience.
En ce qui concerne les conditions de l'expérience, une distinction est faite entre expérience préliminaire, expériences principales et expériences de confirmation [1]. Une expérience préliminaire sert à dégrossir un problème nouveau, alors que les expériences principales constituent le nœud du travail de recherche. Une expérience de confirmation vérifie la validité des conclusions obtenues lors des travaux précédents.

5.2. Facteurs, modalités et combinaisons de ces modalités

Un facteur est une série d'éléments de même nature qui peuvent être comparés au cours d'une expérience. On discerne les facteurs qualitatifs des facteurs quantitatifs [4]. Les différents éléments individuels qui constituent un même facteur sont appelés modalités. Ce terme s'adapte aussi bien dans le cas de variables quantitatives que de variables qualitatives. On considère la notion de variantes pour les facteurs qualitatifs et la notion de niveaux pour les facteurs quantitatifs [3].

5.3. Unités expérimentales observées

L'unité expérimentale est l'élément de base de l'expérience qui est considéré individuellement durant tout le processus expérimental [3]. Chacune de ces unités est soumise, au départ, à un objet ou un traitement particulier. Elle peut se présenter sous des formes différentes. La diversité des situations implique que le choix et le nombre des unités expérimentales doivent être réalisés avec le plus grand soin [5]. Le nombre d'unités expérimentales sont choisis de façon à avoir une puissance de test importante, tout en prenant en compte la faisabilité technique de l'expérimentation [3].

5.4. Observations réalisées et modalités de collecte

Les observations principales sont faites au terme de l'expérience et sont directement liées aux objectifs mis en place au départ. Les observations initiales sont réalisées au début de l'expérience. Elles permettent de disposer d'un certain nombre d'informations relatives aux unités expérimentales avant tout traitement, de façon à définir la ligne de base de l'expérience [1]. Les observations intermédiaires, facultatives, sont différentes des observations principales. Elles permettent d'interrompre l'expérience si besoin, de la réévaluer ou de l'adapter [4].

5.5. Dispositif expérimental

Pour éviter toute interaction entre les différentes unités expérimentales, on procède à une affectation aléatoire des objets aux différentes unités expérimentales. C'est la randomisation [3]. Les dispositifs expérimentaux conçus de cette manière sont dits aléatoires. Il faut noter tout de même que ce type de dispositif peut conduire à certaines anomalies, parfois importantes, lorsque les différentes modalités ne sont pas réparties de façon homogène. En effet, si plusieurs unités expérimentales de la même modalité se trouvent côte à côte, il se peut que les conditions expérimentales présentent un biais lié au dispositif (type de sol, climat, température…).

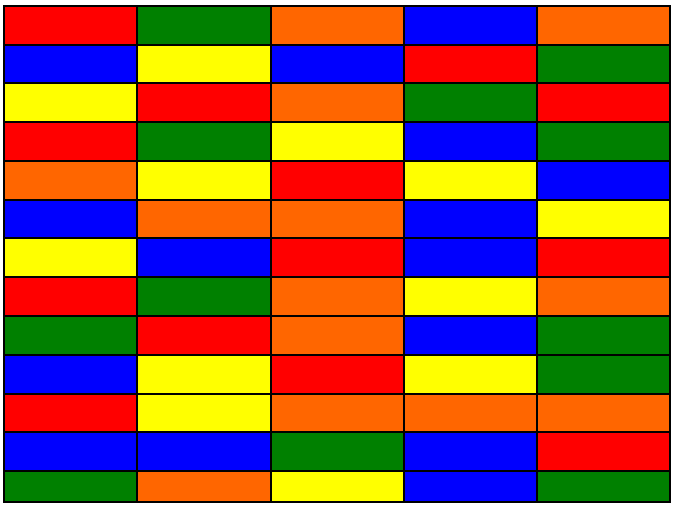


Figure 1 : Répartition homogène des modalités au sein du dispositif expérimental.

5.6. Analyse des résultats

Cette dernière partie, souvent brève et rapide, rappelle de quelle façon vont être analysées les résultats obtenus en fonction du nombre de facteurs et de modalités, mais aussi en fonction du type de dispositif expérimental utilisé et des objectifs initiaux [2]. Une analyse statistique complète est effectuée avec la base de données recueillie de façon à mettre en évidence l'effet de chaque modalité et de répondre à la problématique de départ. Une discussion est alors ouverte, en relation avec les références bibliographiques précédentes, ce qui permet d'ouvrir le débat sur l'expérimentation réalisée de de critiquer l'exactitude des résultats mis en évidence. [1]

Références

[1] Pierre Dagnelie, 2012, *Principes d'expérimentation: planification des expériences et analyse de leurs résultats*, Presses agronomiques, Gembloux, 413 p. (ISBN 978-2-87016-117-3) et édition électronique (PDF).

[2] Experimental Design, disponible sur www.statsoft.com/Textbook/Experimental-Design/button/1, [vu le 10/12/2013]

[3] Sylvain Milla, 2012, *Biométrie, Démarche Expérimentale*, Université de Lorraine, document de cours.

[4] JS Pierre, 2008, *Les plans d'expérience, Initiation à leur analyse et à leur construction.* Université Rennes 1, document de cours.

[5] Cédric d'Ham, 2011, *La construction de protocole expérimental : objet et moyen d'apprentissage,* Cahiers pédagogiques n°469.

6. D'autres produits chimiques alternatifs au sel

Dans le cadre de la viabilité hivernale, la communauté urbaine du Grand Nancy (CUGN) cherche à minimiser l'impact écologique immédiat du déneigement des voies à forte priorité pour une même (voir meilleure) efficacité. Afin de répondre à cette problématique, nous avons mis en place une étude sur les produits alternatifs au sel de déneigement, jusqu'alors utilisé. Ainsi, la phytotoxicité du formiate de potassium et d'un produit à base d'huile de colza (deux fondants alternatifs) sera testée et comparée à celle du sel.

Par ailleurs, d'autres produits peuvent également être utilisés pour le déneigement. Des études ont déjà été effectuées sur ces produits, comparant notamment les propriétés chimiques de ces fondants et leurs conséquences environnementales.

Quels sont ces produits chimiques et que révèlent ces études sur leurs efficacités, leurs prix et leurs impacts écologiques.

6.1. Actions des fondants sur la neige et la glace

La fusion de la glace dépend de la température et de la pression atmosphérique. Ne pouvant influencer ces deux facteurs, les agents chimiques de déneigement jouent sur la composition de la solution aqueuse.

6.1.1. Par abaissement du point de congélation de la solution aqueuse

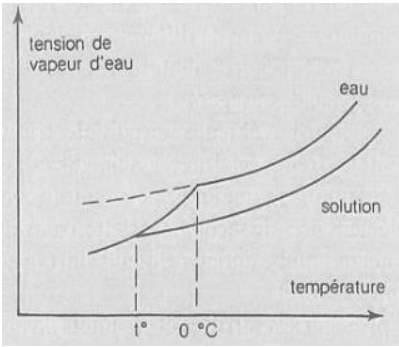


Figure 1 : abaissement du point de congélation par dissolution [1]

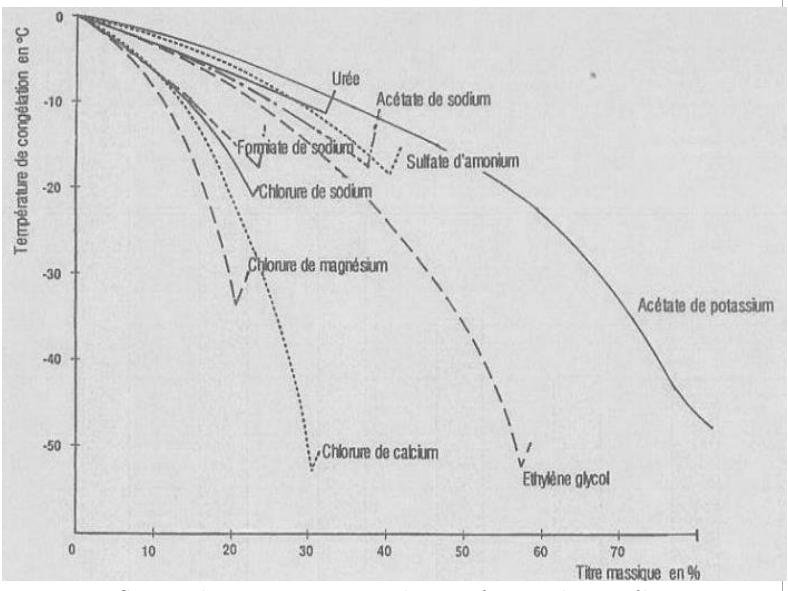


Figure 2 : influence du titre massique sur la température de congélation [1]

La plupart des produits de déneigement agissent en abaissant la température de congélation de l'eau. Au contact de la neige, ils se solubilisent de sorte que la solution (eau + produit de déneigement) a une température de congélation plus basse que l'eau seule. La solution continue à faire fondre la neige environnante car la présence d'une phase solide (la neige) et d'une phase liquide (la solution

aqueuse) fait tendre la température vers la température de congélation (figure 1). Les différents fondants agissent ainsi avec des efficacités variables d'un fondant à l'autre (figure 2).

Cependant, lors de la fonte de la neige, la concentration du produit en solution diminue et par là même son efficacité. C'est pour cela qu'un épandage régulier est nécessaire pour maintenir la concentration en produit suffisante pour garantir son efficacité.

6.1.2. Par une dissolution exothermique

Lorsque que le fondant entre en contact avec l'eau, il subit une hydratation qui en général soit libère, soit demande de l'énergie. Les fondants à dissolution exothermique semblent donc plus appropriés car lors de leur épandage, ils libèreront de la chaleur ce qui aidera à la fonte de la neige environnante. Mais la dissolution exothermique n'est qu'un critère de second ordre, passant après l'efficacité de l'abaissement du point de fusion. Toutefois, verser trop de produits à dissolution endothermique peut avoir l'effet inverse de celui souhaité. En effet, on risquerait de descendre en dessous de la température critique et faire solidifier la solution. [2]

Sont des fondants à dissolution exothermique le chlorure de calcium, le chlorure de potassium et l'acétate de sodium. Sont à dissolution endothermique le chlorure de sodium, le chlorure de magnésium et l'urée technique.

La différence d'efficacité nécessite donc une comparaison des prix non pas aux mêmes quantités mais pour une même efficacité.

6.2. Comparaison prix/efficacité des différents produits avec le sel

La comparaison des différents produits entre eux (tableau 1) a été réalisée sur la base d'un prix moyen au kilo calculé à partir des données accessibles sur internet. Vu la difficulté à obtenir ce type de données, ce prix moyen doit être considéré comme une estimation.

Tableau 1: Comparaison prix / efficacité des différents produits avec le sel

Produit	Chlorure de sodium	Chlorure de magnésium	Chlorure de calcium	Chlorure de potassium	Acétate de potassium	Acétate de sodium	Acétate de calcium	Acétate de magnésium	Urée technique	Ethylène glycol
Prix au kg (euro)	0.45 [4] 0.28 [3] 0.73 [5] 0.55 [11]	0.61 [4] 0.78 [3] 1.96 [6] 1.95 [5] 0.85 [11]	0.96 [7] 0.61 [4] 0.97 [1] 2.55 [5] 2.45 [6]	28.14 [10]	10.29 [6] 58.75 [10] 61.25 [10] 5.21 [11]	8.33 [6] 56.18 [10] 41.62 [10] 52.26 [10] 42.97 [10]	184.2 [5] 72.87 [10] 112.0 [10] 75.77 [10] 61.08 [10]	163.03 [10] 104.73 [10] 56.16 [10] 169.60 [10]	3.74 [5]	7.08 [5] 6.17 [10] 39.15 [14] 71.60 [14]
prix moyen au kg (euro)	0,51 *± 0.16*	1,23 *± 0.67*	1,62 *± 0.81*	28,14	33,88 *± 30.2*	40,27 *± 18.9*	101,18 *± 50.2*	123,38 *± 53.46*	3,74	31,00 *± 31.1*
%massique pour une t° de congélation à -10°C	15% [1]	11% [1]	14% [1]	~13%(*)	35% [8]	26% [1]	~29%(*)	~29%(*)	29% [1]	23% [1]
Prix pour traiter 100kg de glace (à -10°C)	8 *± 2*	14 *± 7*	23 *± 11*	3665(*)	1186 *± 1059*	1047 *± 491*	2934(*) *± 1455*	3578(*) *± 1550*	108	713 *± 716*

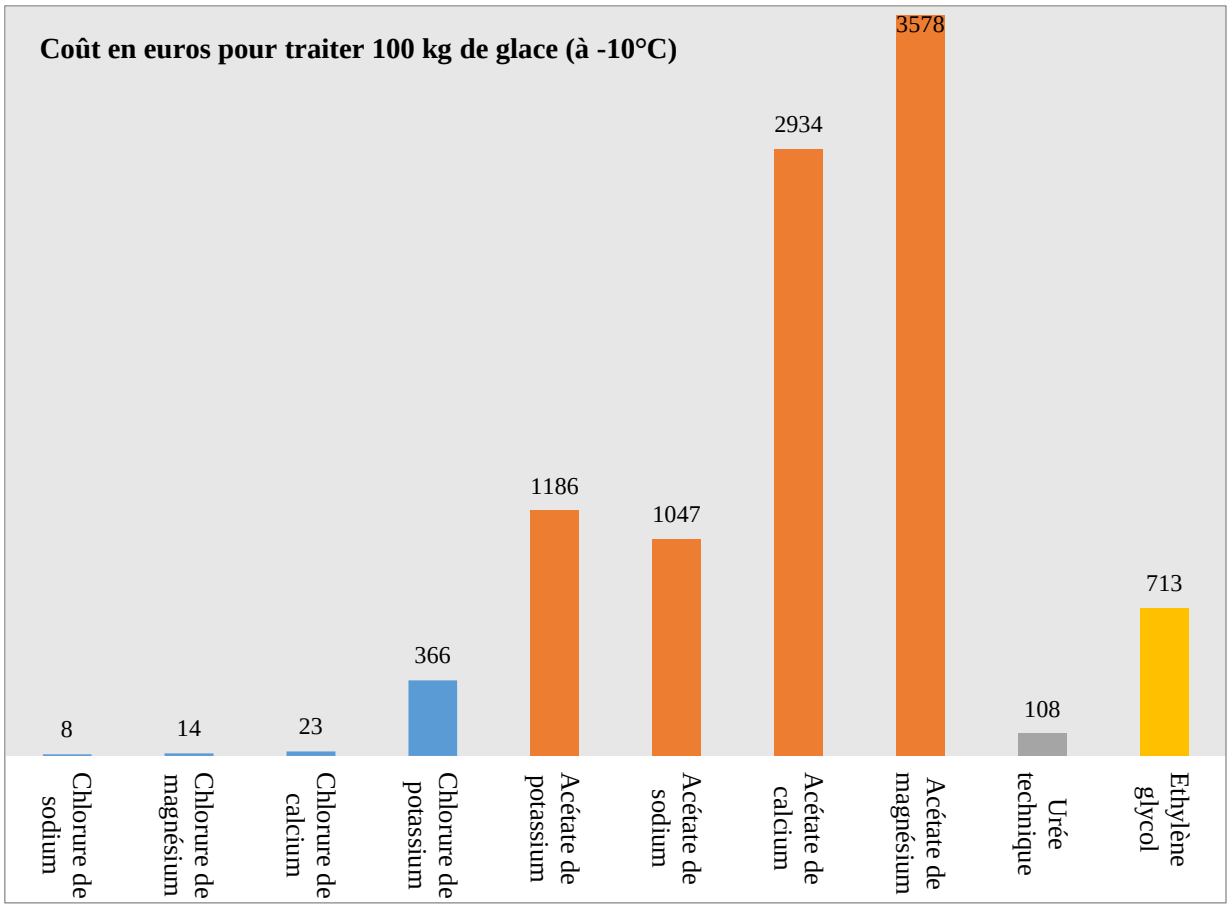


Figure 3 : Comparaison des coûts moyens de traitement de 100 kg de glace à -10°C par différents fondants (euros)

Les produits à base de chlorure ainsi que l'urée technique sont les fondants les plus économiques car ils sont en moyenne vingt fois moins chers que l'éthylène glycol et les produits à base d'acétate (figure 3).

Les comparaisons de prix avantagent assurément les chlorures alcalins et l'urée technique dans le choix d'une politique de déneigement.

6.3. Autres facteurs à prendre en compte.

6.3.1. Formulation

Les différents chlorures ainsi que les acétates de calcium, sodium et magnésium se présentent sous la forme de paillettes blanches, s'épandant ainsi comme le sel de déneigement. [3], [4], [6], [9], [12] et [14].

Il en est de même pour l'urée qui est sous forme de perles blanches. [5]

L'éthylène et l'acétate de potassium existent sous forme de liquide incolore, ce qui nécessite un autre type d'épandage que celui utilisé pour le sel. Si l'un de ces deux produits ou les deux sont utilisés e manière exclusive, il est nécessaire d'adapter tout le parc de véhicule d'épandage [8], [9] et [11]

Il est difficile de comparer les délais d'efficacité des différents produits car aucun protocole commun n'a été mis en place. On peut seulement supposer que les produits exothermiques agiront immédiatement.

6.3.2. Précautions de manipulation et de stockage des différents fondants

Dans une grande majorité, les produits sont irritants, voire très irritants dans le cas de l'acétate de sodium, pour les voies respiratoires, la peau et les yeux. Leur manipulation avant l'épandage nécessite donc le port de gants et de masques. [13] et [14]

Le chlorure de potassium, le chlorure de calcium et l'urée sont de plus toxiques tandis que l'éthylène glycol est mortel en cas d'ingestion. [14]

En, outre, les produits hygroscopiques nécessitent d'être entreposés à l'abri de l'humidité pour éviter tout gonflement. Un produit hygroscopique est un produit qui a la capacité d'absorber l'humidité de l'air. Parmi les produits recensés, l'acétate de calcium et les chlorures sont hygroscopiques ainsi que l'éthylène glycol. [15]

6.3.3. Estimation de la biodégradabilité d'un produit.

Pour quantifier la biodégradabilité d'un produit organique, on peut calculer le rapport DBO sur DCO (tableau 2). En effet, la DBO (Demande Biochimique en Oxygène) est la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder la matière organique tandis que la DCO (Demande Chimique en Oxygène) est celle nécessaire pour oxyder la matière organique ainsi que celle minérale. [8]

Tableau 2 : rapport DBO/DCO des produits organiques.

Produit	Acétate de Sodium	Acétate de potassium	Acétate de Calcium	Acétate de Magnésium	Ethylène Glycol
Biodégradabilité : DBO/DCO	1.5 [6]	1.5 [6]	~1.5 [8]	-	2 [6]

Les produits ci-dessus respectent la législation car la norme demande que ce rapport soit inférieur à 5. Cependant, ce paramètre ne permet pas de comparer tous les produits entre eux puisqu'il ne s'applique pas aux produits uniquement minéraux tels les chlorures et l'urée.

Conclusion

Agissant par abaissement du point de congélation en se mêlant à la neige, les fondants gagnent de l'efficacité à fortes concentrations. Certains ont même une dissolution exothermique, facilitant la fonte. Les traitements à base de chlorure ou d'urée technique sont moins coûteux que ceux à base d'acétate ou d'éthylène glycol. En outre, les acétates sont généralement plus biodégradables que l'éthylène glycol, exposant la plante à des agressions moins longues et ne s'accumulant pas dans le milieu. Cependant, beaucoup de ces produits sont chers par rapport au sel et entrainent des précautions de manipulation et de stockage supplémentaires. De même, l'éthylène et l'acétate de potassium étant sous forme liquide, une adaptation des véhicules d'épandage est nécessaire.

Etudes complémentaires soulevées

- Efficacité des produits sur un protocole commun.

- Délai d'efficacité des produits sur un protocole commun.

Références

[1] Livet J., 1998, *Fondants utilisés pour traiter les chaussées. Matériaux et techniques d'utilisation.* RGRA, n°758 : 28-31. Disponible sur : www.viabilite-hivernale.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/Fondants_utilises_pour_traiter_les_chaussees-2.pdf

[2] Olbregts J., [e.l.], *L'énergie chimique*, InforSciences, Université Libre de Bruxelles. www.ulb.ac.be/sciences/intra/inforsc_archives/nrj/olbregts1.htm

[3] Sel de déneigement. Consulté le 12/12/2013 sur : www.voussert.fr/sel-de-deneigement-sf-36259.html

[5] Ethylène Glycol. Consulté le 31/11/2013 sur : www.mon-droguiste.com/mono-ethylene-glycol,fr,4,MONETH13013DSN.cfm#.UrP3yLTpiSo

[6] Poissonnier S., 2012, Réduire l'impact du service hivernale sur l'environnement, Journée technique CoTITA Méditerrannée, 10 mai, CETE de l'Est, Laboratoire Régional de Nancy.

[7] Sel de déneigement, chlorure de calcium. Consulté le 05/01/2013 sur : www.zimmersa.com/divers/2876-sel-de-deneigement-chlorure-de-calcium-sac-25kg.html

[8] Marchetti M., Poissonnier S., Mars B., 2010, *Évaluation de la performance des produits de déverglaçage* - Rapport d'étude, version V4 du 17/12/09, Ref : RAP/STAC/ACE/DEV/10-0030, 38 p www.stac.aviation-civile.gouv.fr/publications/documents/eval_pro_devergla.pdf

[F] The Salt Use Improvement Team. Consulté le 11/11/2013 sur : www.oseh.umich.edu/environment/wintermaint.shtml

[9] Etude comparatives d'acétates et formiates de potassium. Consulté le 11/11/2013 sur : www.viabilite-hivernale.equipement.gouv.fr/les-proprietes-physiques-des-a4286.html

[10] Vente de produits chimiques avec fiches techniques. Consulté le 05/01/2013 sur : www.allsciences.com

[11] Vente de produits chimiques avec fiches techniques. Consulté le 05/01/2013 sur : www.haleco.fr

[12] Vente de produits chimiques avec fiches techniques. Consulté le 05/01/2013 sur : manager-articles.com/%EF%BB%BFproduits-chimiques-de-deneigement/

[13] Vente de produits chimiques avec fiches techniques. Consulté le 05/01/2013 sur : www.anachemia.com

[14] Vente de produits chimiques avec fiches techniques. Consulté le 05/01/2013 sur : ca.vwr.com/store/catalog/product.jsp?catalog_number=CAAA11005-14

[15] Définition de l'hygroscopique : www.cnrtl.fr/definition/hygroscopique

7. Les différentes techniques physiques de déneigement

Dans le cadre de la viabilité hivernale, il est nécessaire de maintenir ou de rétablir les conditions de circulation, le plus rapidement possible, afin d'assurer la sécurité des différents usagers. Pour lutter contre les accumulations de neige, de verglas, le plus souvent on a recours au salage des routes. Cependant cette technique soulève actuellement de nombreuses questions environnementales. En effet le sel s'accumule dans le sol, modifie sa structure et induit des effets négatifs sur les plantes qui s'y trouvent. [1]
L'objectif de ce travail bibliographique est de présenter les différentes techniques physiques qui permettent d'assurer le déneigement.

7.1. Principe de fonctionnement de ces différentes techniques

7.1.1. Amélioration de l'adhérence de la chaussée glissante :

Pour améliorer l'adhérence des pneumatiques à la chaussée glissante, la technique la plus couramment utilisée est l'épandage d'abrasifs. Cette technique ne constitue pas un moyen de prévention. Les abrasifs peuvent parfois contribuer à la fonte de la glace, dans le cas de matériaux foncé (qui ont une plus grande capacité calorifique). [2]
L'épandage d'abrasifs est la technique la plus ancienne utilisée dans le cadre de la viabilité hivernale. Cette technique est toujours largement utilisée dans les Alpes ou encore le nord de Scandinavie où les hivers sont rigoureux. On observe actuellement un nouvel intérêt pour l'épandage d'abrasifs. En effet depuis 1980, le salage est remis en question du fait des nombreuses interrogations environnementales qu'il soulève. [3] Ces interrogations portent notamment sur l'impact du sel au niveau du sol : une concentration élevée en sel entraine une modification de la structure des sols (qui se traduit par un compactage), mais également une accumulation de sel au niveau des racines des végétaux, ce qui provoque des perturbations de leur métabolisme. L'utilisation de fondants impact également la teneur en sel des eaux usées des communes et des routes.

Un abrasif est formé de granulats broyés, ces granulats doivent présenter des arrêtes aussi vives que possible. Ce sont essentiellement des résidus industriels : sables, graviers, mâchefers (résidus solides de la combustion du charbon, ou de la combustion de déchets urbains dans les usines d'incinération), scories (déchets solides provenant des opérations de traitement des minéraux métalliques ou de l'affinage de certains métaux). [4]
Le calibre des granulats est très important (cf. figure 1), la granulométrie est comprise entre 1 et 5 mm, la limite étant de 8 mm.

Verglas	Neige verglacée ou glace	Neige tassée
Matériaux de granulométrie fine	Matériau de granulométrie moyenne associés à une grande quantité d'éléments fins	Matériaux de granulométrie moyenne

Figure 1 : Granulométrie utilisée en fonction du type de contrainte hivernale (d'après [3])

Le calibre est un paramètre très important. En effet s'il est trop faible les granulats risquent d'être emportés par le vent, s'il est trop important les granulats peuvent endommager le pare-brise des voitures.
L'épandage d'abrasifs est une technique essentiellement utilisée localement dans les zones urbaines, sur les routes à faible trafic, dans les régions ou les pneus à clous sont interdits et dans le cas où les conditions climatiques n'entrainent pas une disparition rapide du manteau neigeux.

7.1.2. Techniques assurant la fonte de la neige, du verglas

Le chauffage des routes par couplage énergétique évite la formation de gel en hiver et permet la fonte de la neige en utilisant une source d'énergie fossile ou renouvelable.

Au Japon certaines voies de circulation sont chauffées grâce à des résistances électriques incorporées au revêtement de la route ou aux trottoirs. Des panneaux radiant électriques, incorporés aux voies de circulation, peuvent également permettre leur chauffage. Les routes peuvent être chauffées par un réseau de fluide caloporteur (lequel est chauffé grâce à une chaudière alimenté par carburant fossile) incorporés dans le revêtement. [5]

Plusieurs projets s'intéressent notamment au stockage géothermique, c'est-à-dire au stockage d'énergie sous forme de chaleur dans des réservoirs de vapeur, d'eau chaude ou encore de roches chaudes. Les réservoirs utilisés (aquifères) sont situés à de grandes profondeurs. Deux forages permettent d'alimenter une boucle thermique : de l'eau froide est prélevée en un point de l'aquifère, cette eau est réchauffée en surface (énergie solaire, pompe à chaleur), puis réinjectée en un autre point de l'aquifère. Cette eau « chaude » peut ainsi être stockée pendant plusieurs mois. En France, on s'intéresse aux nappes d'eau souterraines comme réservoirs géothermique afin de chauffer notamment des voies de circulation. Dans un grand nombre de pays tels que le Japon, le Danemark, le chauffage hivernale des routes est assuré grâce au stockage géothermique et à des pompes à chaleur. En Suisse, le chauffage des routes peut être assuré grâce au stockage géothermique solaire (SERSO) : un capteur d'énergie envoie un fluide réchauffé par le soleil et le vent vers un réservoir de stockage de chaleur. Un projet français s'intéresse à la récupération de l'énergie de cours d'eau « chaudes » afin de chauffer les revêtements routiers.

- L'utilisation de cendres :

Les cendres sont disponibles facilement et quand elles sont déposées sur la neige, permettent la fonte de la neige lorsque la température est douce et le temps ensoleillé. En effet les cendres présentent une capacité calorifique importante, elles vont emmagasiner les rayonnements solaires et donc accélérer le dégel.

7.1.3. L'élimination de la neige de la chaussée : le déneigement par mécanisation :

Le déneigement par mécanisation permet d'éliminer la neige de la chaussé, sans nécessité de la traiter. Il existe différents outils qui permettent soit de réduire l'épaisseur résiduelle de neige (le raclage), soit de supprimer la totalité de la neige présente sur la route par soufflage et balayage (les fraises à neige). [5]
Le raclage permet d'évacuer la neige accumulée sur la route, en la désolidarisant du revêtement et la rejetant sur le bord de la chaussée. [6]

Les fraises à neiges (turbines, fraiseuses, turbofraiseuses) disloquent, entraînent et projettent la neige dans la direction voulue. [7]

7.2. Etude de l'efficacité et du prix de ces différentes techniques

7.2.1. L'Efficacité de ces techniques :

- L'épandage d'abrasifs :

Cette technique permet seulement une faible amélioration de l'adhérence, laquelle n'est que de courte durée. En effet les matériaux épandus sont rapidement chassés par la circulation ou bien peuvent s'incruster dans la neige. Il est donc nécessaire d'épandre ces abrasifs plusieurs fois par jour. De plus des séries d'essais réalisés sur des axes à grande vitesse avec un trafic important et des carrefours importants en agglomération, ont montré que les matériaux abrasifs sont moins performants que le sel. Il est donc nécessaire d'appliquer des quantités plus importantes que dans le cas du salage. En effet pour un minimum d'adhérence il faut environ 100g/m² d'abrasifs contre 10 à 30 g/m² de NaCl. [3]

- Les cendres :

Pour que les cendres puissent emmagasiner la chaleur et ainsi faire fondre la neige, il est nécessaire que le temps soit ensoleillé et la température douce. Cependant, même si les conditions météorologiques sont respectées l'effet dégelant est plutôt long et les cendre ne permettent en aucun cas de faciliter l'adhérence à la surface enneigée.

- Le chauffage de la route par couplage énergétique :

Cette technique permet la fonte de la neige et empêche la formation de gel sur les routes. De plus cette technique ne nécessite aucune intervention supplémentaire pour permettre la viabilité hivernale. Une fois mise en place, il s'agit donc de techniques plutôt efficaces.

- Le déneigement par mécanisation :

Les différents outils de déneigement n'interviennent que sur des surfaces enneigées. Cette technique n'est utilisée qu'au moment où les précipitations ont pris fin et seulement lorsque l'accumulation de neige est trop importante pour que le salage permette d'éliminer complètement la couche de neige. C'est-à-dire lorsque le neige forme une couche de 2 à 3 cm ou plus. De plus il est parfois nécessaire, après ce déneigement mécanique, d'épandre des fondants routiers. Le traitement par mécanisation, ne permet pas, à lui seul, d'assurer la viabilité hivernale, il s'agit donc d'une technique relativement peu efficace.

7.2.2. Le coût de ces différentes techniques :

- L'épandage d'abrasifs :

Cette technique revient beaucoup plus chère que le salage compte tenu :
- De la quantité plus importante de produits à épandre (100g/m² d'abrasifs contre 10 à 30 g/m² de NaCl). [3]
- De la consommation de carburant plus élevée (liée aux épandages plus fréquents)

- Du coût énergétique de production élevé. En effet, la quantité d'énergie nécessaire pour produire un abrasif est double de celle nécessaire pour produire un fondant du type NaCl. [3]

Les cendres sont essentiellement utilisées par les particuliers qui souhaitent déneiger devant leurs habitations. Elles sont facilement accessibles (notamment pour les personnes qui disposent d'une cheminée, d'un poêle. Les cendres ne sont alors qu'un sous-produit du chauffage). Le coût de ce produit est alors négligeable.

- Le chauffage de la route par couplage énergétique et le déneigement par mécanisation

Dans les deux cas, il faut prendre en compte le coût important de l'acquisition et de l'installation du matériel. Le recours aux énergies fossiles pour chauffer les routes a été abandonné par de nombreux pays. En effet actuellement il s'agit d'une énergie rare et chère. De la même manière dans le cas du recours aux énergies renouvelables, la mise en œuvre de ces énergies peut consommer de l'énergie non renouvelable. [5]

7.3. Les impacts de ces différentes techniques sur l'environnement

7.3.1. L'épandage d'abrasifs :

L'intérêt de l'épandage d'abrasif est l'absence de substances chimiques actives qui affectent l'environnement. Cependant il est nécessaire d'épandre de grandes quantités d'abrasifs qui s'accumulent le long des routes. Or lorsque la neige et le verglas ont disparu les matériaux restés sur la chaussé peuvent obstruer les canalisations, il arrive que ces matériaux détériorent les canalisations, il est alors nécessaire de prendre en considération les opérations de maintenance qui en résultent. De plus il y aura une quantité de sable plus importante à traiter au niveau des stations de traitement des eaux. Ces abrasifs restés sur la chaussé peuvent également être à l'origine d'accidents.
De plus l'abrasion des granulats par le trafic entraine la formation de poussières. Les poussières de taille inférieur à 10 µm peuvent être inhalé par les usagers et générer des problèmes de santé publique. C'est notamment pour cette raison que le Japon a interdit l'usage d'abrasifs et de pneus à crampon et utilise alors uniquement le sel. [3]

Plusieurs études ont mis en évidence le fait que ces abrasifs peuvent fixer une partie des métaux lourds. Une étude réalisée au Québec a permis de montrer que les poussières issues de l'abrasion des granulats absorbent des métaux lourds et des colloïdes néfastes au milieu aquatique. Ainsi en Suisse des réglementations imposent le ramassage et le traitement de ces abrasifs avant mise en décharge. [3]

7.3.2. Les cendres :

L'épandage de cendres est à proscrire sur des surfaces trop importantes, à cause de la poussière qui en résulte et qui peut être inhalée par les usagers. De plus ces cendres peuvent contenir des métaux lourds, que l'on pourrait retrouver dans les eaux superficiels. [3]
Cette technique nécessite, une fois les zones dégagées, un nettoyage des surfaces.

7.3.3. Le chauffage des routes par couplage énergétique :

Cette technique permet d'éviter l'emploi de fondants chimiques en limitant donc leurs conséquences sur l'environnement. De plus elle ne nécessite l'intervention d'aucun véhicule (dans le

cadre du déneigement), contrairement à la plupart des autres techniques, il n'y a donc pas de production carbone lié au transport.

7.3.4. Le déneigement par mécanisation :

Cette technique permet seulement de limiter l'utilisation des fondants routiers, ce qui permet donc de limiter leur impact sur l'environnement. [8]

Conclusion

Ces différentes techniques n'ont pas le même principe de fonctionnement. En effet l'épandage d'abrasifs permet l'amélioration de l'adhérence de la chaussée, le chauffage des routes par couplage énergétique ainsi que l'utilisation de cendres permettent la fonte de la neige, enfin le déneigement par mécanisation assure l'élimination de la neige de la chaussée. Cependant la plupart de ces techniques sont couteuses, à l'exception de l'utilisation de cendres qui est essentiellement destinée aux particuliers. Le chauffage des routes par couplage énergétique est une technique très efficace mais du fait du cout élevé de l'installation, elle est seulement utilisée sur de petites surfaces. Les autres techniques sont relativement peu efficaces. En effet les abrasifs ne permettent qu'une faible augmentation de l'adhérence, laquelle n'est que de courte durée (nécessite de nombreux épandage chaque jour). L'utilisation de cendres n'est efficace que par temps ensoleillé, malgré cela le dégel est plutôt long. Enfin le déneigement par mécanisation n'est utilisé que lorsque l'accumulation de neige est trop importante et nécessite tout de même l'utilisation de fondants routiers.

Références

[1] http://www.arbres-caue77.org/medias/files/l-impact-du-sel-sur-les-arbres.pdf
[2] http://www.haleco.fr/Haleco/expertise/dossier_protection_sel_deneigement.jsp
[3] http://www.viabilite-hivernale.equipement.gouv.fr/les-abrasifs-r1685.html
[4] http://fr.wikipedia.org/wiki/Sablage_(route)
[5] http://www.viabilite hivernale.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/Quelles_solutions_substitutives__cle2e3f7e.pdf
[6] http://www.viabilite-hivernale.equipement.gouv.fr/le-raclage-a4538.html
[7] http://www.viabilite-hivernale.equipement.gouv.fr/les-fraises-a-neige-a4192.html
[8] http://fr.wikipedia.org/wiki/Raclage_(route)

8. Les différentes politiques de déneigement appliquées par des agglomérations

Le choix de politique de déneigement n'est pas un choix aisé pour les agglomérations. Leur problème est d'assurer la sécurité des habitants en rendant les routes et trottoirs praticables, c'est à dire avec un minimum de glace ou neige dans un délai restreint avec des produits peu coûteux et rapidement efficace. Le sel est apparu comme une solution incontournable (produit fondant peu couteux et grande efficacité de déneigement), cependant il présente des effets négatifs sur les sols et la flore. Des agglomérations souhaitant éviter les effets négatifs de ce produit fondant ce sont alors tourné vers des produits alternatifs. Les agglomérations étudiées ici ont les mêmes contraintes météorologiques que Nancy, c'est-à-dire une contrainte importante de déneigement durant l'hiver. Quels sont les choix privilégiés de déneigement des agglomérations subissant des précipitations neigeuses pendant l'hiver ? Nous observerons dans un premier temps qu'une grande proportion d'agglomérations n'utilise que le sel en moyen de déneigement, puis nous verrons les différentes alternatives au sel et l'effet de ce choix, puis que certaines agglomérations ont fait le choix de diminuer les doses de sel épandues en utilisant en parallèle des produits alternatifs. Finalement, une réflexion sur les infrastructures et les méthodes d'épandage doit être prise en compte pour la viabilité hivernale.

8.1. Le sel, un fondant majoritairement utilisé

Introduction

Dans les agglomérations françaises, le chlorure de sodium (NaCl) représente l'essentiel des produits fondants (>99.5%), avec une consommation variant de 250 000 à 700 000 tonnes selon les hivers. La majorité des villes a gardé cette technique de déneigement, efficace et moins couteuses (80 euros /tonne) [1].

A Metz comme à Nancy, pour une meilleure efficacité, la saumure est utilisée (mélange de sel solide et d'eau). Ce mélange fondant est plus réactif que le sel pur et permet de traiter les voiries à de plus faibles températures. Cependant une réflexion est faite sur les doses appliquées pour des raisons économique et environnementale, car en temps de grand froid et de précipitations neigeuses intenses, l'épandage est réalisé selon différents niveaux de priorité :

- Niveau 1 : Les grands axes structurants (voies des bus, rues à fort trafic, axes permettant l'accès aux voies rapides et autoroutes, centre-ville)
- Niveau 2 : Axes secondaires permettant de maintenir l'activité économique et sociale de la ville.
- Niveau 3 : Le reste du réseau routier. [2]

La majorité des grandes villes de l'Est de la France applique cette politique d'intervention différentielle, pour agir le plus efficacement possible.

Outre atlantique à Toronto comme dans la majorité des agglomérations du nord de l'Amérique du Nord, le sel est utilisé en quantité très importante. Malgré différentes études démontrant la nocivité

d'une concentration en sel excessive dans les réserves d'eau souterraine, celui-ci reste le produit utilisé. En effet, 45% des sels épandus sont lessivés par les eaux de pluie.
Pour pallier à ce problème, une stratégie de service hivernal différencié a été mise en place dans une majorité d'agglomérations européennes et nord-américaine qui continuent d'utiliser le sel. Pour concilier efficacité du déneigement et protection de l'environnement, les mesures suivantes sont souvent utilisées : le déblayage mécanique reste prioritaire, restreindre le salage aux axes prioritaires vus précédemment et contrôler le strict dosage de sel épandu.

Ainsi dans les agglomérations allemandes a été mise en place en 2012 une nouvelle politique visant à limiter l'épandage de sel tout en maintenant un service maximum (uniformisation de la réglementation à l'ensemble du pays):

Situation à régler	Mesures conseillées pour le service hivernal	
Gel	Epandage préventif	– Epandage liquide à privilégier* – Sinon salage humide
Humidité givrante (fine couche de gel)	Epandage préventif	– Epandage liquide à privilégier* – Sinon salage humide
Forte humidité givrante (Couche de gel)	Epandage préventif	– Salage humide ou épandage liquide*
Pluie givrante (Gel, glace)	Si possible épandage préventif	– Epandage liquide à privilégier* – Sinon salage humide
Chute de neige (neige givrante)	1. Si possible épandage préventif liquide* ou salage humide 2. Déblayage pendant les chutes de neige et épandage avec une densité restreinte de sel humide 3. En fin de chutes de neige, déblayage intensif et salage humide	
	* **Indication:** épandage liquide uniquement jusqu'à –6°C, en cas de température plus basse, uniquement salage humide	

Figure 1 : politique de service hivernal appliqué en Allemagne [3]

Cependant le salage préventif est règlementé en Suisse (volonté d'une économie maximale de la quantité de sel épandue). De nouvelles études montrent pourtant que dans certaines conditions météorologiques, cette technique permettrait une économie de sel en empêchant dès le début de l'épisode neigeux la fonte de la neige sur la chaussée.

8.2. Les produits alternatifs utilisés pour le déneigement

Différentes agglomérations ont choisi des produits alternatifs au sel pour soit éviter une pollution des sols et des nappes d'eau (réseau fluviatile ou nappe phréatique) ou bien une corrosion aux infrastructures urbaines causée par ce produit.
Une des solutions les plus pragmatiques est le déneigement mécanique (aucun ajout de produit fondant sur la chaussée), comme sur l'aéroport de Cointrin (Genève). Cependant une soixantaine de véhicules avec des lames et des souffleuses sont nécessaires, ce qui représente de gros moyens mis en

œuvre [4]. De plus un tarmac est parfaitement plat, ce qui facilite le délaiement, contrairement à une chaussée d'agglomération.
La ville canadienne de Magog a elle fait le choix de n'utiliser que des produits abrasifs dans des quartiers où le sel avait un impact nocif sur l'environnement (bordure de lac et de rivière). Cependant ce plan ne peut être réalisé que dans certaines conditions qui sont l'absence de pente où que l'artère traitée soit une artère secondaire. Ce plan a permis de ne traiter que 5% des voiries mais a permis d'épargner les zones à plus fort risque de pollution (aucun résultat transmis sur le réel impact de cette mesure). Ce type d'abrasif doit cependant être récupéré et traité pour éviter d'endommager les infrastructures et de boucher les drains d'évacuation des eaux [5]. En Suisse sont aussi testés ces produits atténuant les gènes de l'enneigement. Ainsi le gravillon est utilisé sur les routes secondaires ou trottoirs plans, ou bien les routes principalement déblayées en laissant une couche de neige. Le gravillon est en réalité très peu utilisé à cause dégâts aux véhicules et de la difficulté de sa récupération. Le sable ou la pouzzolane possèdent les mêmes qualités, mais aussi le défaut de boucher les évacuations d'eau, dégrader les canalisations, et le traitement en station de ces abrasifs posent problème.

Dans la ville de la Chaux de fond en Suisse, des copeaux de bois imprégnés d'un fondant écologique sont utilisés sur les routes et trottoirs du centre-ville. Cet antidérapant lié à un fondant routier permettrait en un seul épandage de sécuriser pendant 5 jours la voie ainsi traitée. [6]

Cependant peu de retour d'expérience sont disponible concernant ces alternatives au sel de déneigement.

8.3. Le compromis Sel /Produit alternatif

En Suisse sont testés différents produits dégelant alternatifs comme le Safecote, une mélasse à base de canne à sucre possédant un très bon effet fondant. Cependant son prix supérieur au NaCl fait qu'il n'est utilisé que comme adjuvant dans la saumure (effet seulement en traitement préventif). [7]

Dans certaines villes comme Sceaux, les routes secondaires sont traitées par un mélange de sel et de sable ce qui permet de réduire dans de grandes proportions l'épandage de sel (1/1 : entre 0 et -5°C ; 1/10 inférieure à -5°C), [8] comme dans le comté de Winnipeg. L'utilisation de cet abrasif entraine cependant des problèmes lors du nettoyage de la voirie, ou bien l'obstruction de drains.
Des contraintes physiques font qu'à une température inférieure à -8°C, le sel devient inefficace. La politique de déneigement alors mise alors en place est d'utiliser un abrasif en complément, qui est le sable dans la majeure partie des situations. [10]
Peu d'agglomérations ont fait le choix d'utiliser un traitement liant le sel à un traitement alternatif, car les conditions d'utilisation de sel et d'un produit alternatif en parallèle sont assez restreinte (conditions de températures), ainsi que leur mode d'épandage pouvant être différent. Différents stockages seraient aussi nécessaires, avec un coût plus important.

8.4. Mesures architecturales et méthodes d'épandage

La viabilité hivernale doit être prise en compte lors de la réalisation d'une nouvelle voirie pour à la fois faciliter le déblaiement de la neige (une mesure privilégiée) et protéger un maximum les arbres d'alignement de l'effet du sel. Ainsi, des infrastructures empêchant l'écoulement des eaux de surface chargée en sel au pied de l'arbre permettraient d'éviter leur intoxication. Cependant ces

aménagements peuvent avoir certains aspects négatifs, comme le manque d'eau en été, ce qui imposerait un arrosage pendant cette période.

Cette mesure architecturale permettrait un traitement de la voirie avec un minimum de fondant rejeté un pied du plant, si la méthode d'épandage est précise et ciblée. En effet, l'épandage liquide sous forme de saumure permettrait une diminution 2 g/m² de sel déversé [11], avec une même efficacité. Cette technique ménage donc l'apport de sel, et l'épandeur à saumure permet de traiter plus précisément la voirie sans projections au pied de l'arbre.

Aussi, l'utilisation de matériels d'épandage plus récent permet une réduction de la quantité de sel déposé pour un même effet fondant (10 (voire 15) g/m² épandus en moins). [11]

Conclusion :

Malgré le fort impact du sel de déneigement sur la pollution des cours d'eau et des nappes phréatiques, ce fondant reste largement utilisé par les agglomérations européennes et nord-américaine. Cependant les politiques de déneigement sont désormais structurées, et les dosages à appliquer dépendent de la catégorie de la voie, des précipitations et des températures.

Assez peu de politiques reposent sur des fondants alternatifs, l'alternative la plus utilisée étant le déblaiement mécanique. Ainsi une réflexion préalable sur l'infrastructure de la chaussée ainsi que l'espace alloué aux arbres d'alignement doit être effectuée, pour faciliter le déblaiement mécanique sans projections abusives au pied des végétaux. La préservation de l'environnement a permis de trouver des méthodes et produits alternatifs au sel. Cependant, une étude de ces produits alternatifs doit être effectuée afin de conclure sur la solution qui présente effectivement l'empreinte écologique la plus faible selon les conditions météorologiques ou topographiques de l'agglomération considérée.

Références

[1] : 2011. Aspects quantitatifs et coûts. Disponible sur: http://fr.wikipedia.org/wiki/Salage_(route)

[2] : 2012. Viabilité hivernale de la ville de Metz. Disponible sur : http://www.mairie-metz.fr/pages/mobilite/viabilite_hivernale.php

[3] : BRUDERHOFER K. 2013 Union Suisse des services des parcs et promenades. Sels de déneigement : effets sur les arbres d'alignement. Mesures et recommandations. Disponible sur http://www.vssg.ch/documents/Sel_de_deneigement_effets_sur_les_arbres_d-alignement_2013_F_L.pdf

[4] : MERTENAT T. 2013. Tribune de Genève. Disponible sur :http://www.tdg.ch/geneve/actu-genevoise/Cointrin-lance-son-armada-pour-deneiger-piste-et-tarmac/story/30344990

[5] : 2011. Politique de viabilité hivernale. 3.0 Entretien hivernal effectué par la ville. Disponible sur : http://www.ville.magog.qc.ca/ckeditor/ckfinder/userfiles/files/EntretienHivernal/PolitiqueViabiliteHivernale.pdf#search="déneigement"

[6] : MERZ Y. 2009. Les copeaux de bois : une solution bio contre le verglas qui fait son chemin. Disponible sur : http://stopglissbio.com/presse/24h.pdf

[7] : 2009. L'Essentiel. Du sucre pour déneiger les routes ? Disponible sur :http://www.lessentiel.lu/fr/news/luxembourg/story/30355470

[8] : 2013. Politique de viabilité hivernale de la ville de Sceaux. Disponible sur :http://www.sceaux.fr/sites/www.sceaux.fr/files/guide_hiver_sceaux-2013.pdf

-

[9] : 2010. Conso Globe. Salage des routes. Disponible sur : http://www.encyclo-ecolo.com/Salage_des_routes
[10]: BRUDERHOFER K. 2013 Union Suisse des services des parcs et promenades. Sels de déneigement : effets sur les arbres d'alignement. Optimisation de la technique d'épandage et du dosage. Disponible sur : http://www.vssg.ch/documents/Sel_de_deneigement_effets_sur_les_arbres_d-alignement_2013_F_L.pdf