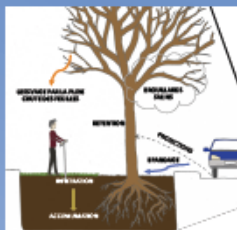


# ETUDE DE L'IMPACT DU SEL DE DENEIGEMENT SUR LES FOSSES DE PLANTATION

La viabilité hivernale est primordiale afin de permettre une bonne circulation urbaine malgré la neige. Pour cela, la France épand 750 000 à 1 650 000 tonnes de chlorure de sodium chaque année. En ville, le sel engendre diverses perturbations métaboliques sur les arbres, qui meurent prématurément. L'enjeu principal pour la Communauté Urbaine du Grand Nancy (CUGN) est donc de déterminer le type de fosse de plantation le plus adapté à l'environnement urbain permettant de protéger au maximum les arbres des effets néfastes du sel.

Nous recherchons donc des relations entre présence du sel dans le sol et caractéristiques des fosses de plantation.



## Principaux impacts du sel sur la plante

- Perturbation du métabolisme
- Perturbation de l'assimilation de minéraux par la plante et phénomènes de carences
- Perturbation de sa croissance et de son développement
- Diminution de l'absorption d'eau
- Lésions pouvant nuire à l'activité photosynthétique

## Protocole

- Prélèvements d'échantillons sur 40 sites répartis dans la CUGN avant et après épandage de sels
- Chaque point de prélèvement est composé d'un échantillon de surface (0-20 cm) et de profondeur (20-40 cm)
- Tamisage de tous les échantillons à 2mm
- Mesure de différents paramètres chimiques des sols
  - CEC : Capacité d'échange cationique → pH
  - Conductimétrie → Dosage sel
- Les différences de résultats entre les sols avant et après épandage nous permettront de connaître l'impact des sels sur la structure du sol
- Etude de l'infrastructure des fosses de plantations aux points de prélèvements.
- Analyse statistique → Vérification du lien entre l'infrastructure de la fosse et l'impact du sel sur les plantes

Détermination des caractéristiques idéales d'une fosse de plantation face aux contraintes de la viabilité hivernale

## Cartographie des points de prélèvements

- Communes du Grand Nancy
- Prélèvements
- Ateliers
- Routes



## Caractéristiques des fosses de plantations

- Présence ou non d'une rambarde de protection
- Végétation au pied de l'arbre
- Espèce, diamètre du tronc
- Inclinaison de la fosse
- Exposition (Nord, Sud, Est, Ouest)
- Distance à la route
- Hauteur du trottoir
- Recouvrement et pente du trottoir
- Exposition au sel (simple / double)
- Surface de la fosse

Par différentes mesures dans nos prélèvements de sols, nous allons déterminer quels types de fosses de plantation sont le plus impactés par le sel, et lesquels permettent une meilleure viabilité des arbres, tout en respectant les spécificités de la ville.



Année 2015-2016

VIABILITE HIVERNALE ET  
EVALUATION DE L'IMPACT DU SEL DE  
DENEIGEMENT SUR LES SOLS :  
INFLUENCE DE L'INFRASTRUCTURE  
DES FOSSES DE PLANTATION

TUTEURS

Pierre LEGLIZE – Catherine SIRGUEY

RÉALISÉ PAR

Robin DAVESNE – Justine DE MINGUINE – Claire EGLOFF – Margot GORTAIS

–  
Valentin VOISIN



UNIVERSITÉ  
DE LORRAINE



**GrandNancy**  
COMMUNAUTÉ URBAINE & HUMAINE

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION</b>	<b>3</b>
<b>1- ETAT DE L'ART</b>	<b>3</b>
<b>1.1 L'ENJEU DU DENEIGEMENT DANS LA COMMUNE DU GRAND NANCY</b>	<b>3</b>
A) UN CLIMAT NANCEEN	3
B) VIABILITE HIVERNALE EN LORRAINE	5
C) LE DENEIGEMENT EN LORRAINE	5
<b>1.2 L'IMPACT DU RECOURS AU SALAGE POUR LE DENEIGEMENT DES ROUTE</b>	<b>6</b>
A) IMPACT DU SEL SUR LES SOLS URBAINS	7
B) IMPACT DU SEL SUR LES VEGETAUX DES TERRES PLEINS	9
C) MECANISMES DE RESISTANCE CHEZ LES ESPECES HALOPHYTES	11
<b>1.3 LES ALTERNATIVES POUR LIMITER CET EFFET NEGATIF</b>	<b>12</b>
A) PROTECTION PHYSIQUE DES PLANTS	12
B) AMENAGEMENT DES FOSSES DE PLANTATION	12
C) UTILISATIONS D'ALTERNATIVES AU SEL	13
<b>2- ETUDE DES SOLS DES FOSSES DE PLANTATION</b>	<b>19</b>
<b>2.1 PRELEVEMENTS DES ECHANTILLONS</b>	<b>19</b>
<b>2.2 CALCUL DE LA CEC</b>	<b>20</b>
<b>2.3 CALCUL DU PH ET DE LA CONDUCTIVITE</b>	<b>22</b>
<b>2.4 DOSAGE DES IONS DU SOL PAR ICP-AES</b>	<b>23</b>
<b>3- RESULTATS ET DISCUSSION</b>	<b>24</b>
<b>3.1 ANALYSE DE L'ACP</b>	<b>24</b>
<b>3.2 ANALYSE DES BOXPLOTS</b>	<b>25</b>
<b>CONCLUSION</b>	<b>29</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>30</b>
<b>ANNEXE</b>	<b>32</b>

# INTRODUCTION

Pour la plupart des hivers, la commune du Grand Nancy connaît des températures basses qui amènent neige et gel. Alors que 70 % de la population est active, il est nécessaire d'établir des mesures permettant le maintien de l'activité économique de la ville et la sécurité des usagers. L'un des objectifs de la Communauté Urbaine du Grand Nancy (CUGN) est de conserver de bonnes conditions de circulation dans une agglomération aussi importante que Nancy. Pour cela, le moyen le plus simple et le moins coûteux afin de conserver ce dynamisme est l'épandage de chlorure de sodium (NaCl) plus communément appelé sel.

La première partie de ce rapport traitera des impacts du sel sur l'environnement et les arbres en ville, puis les paramètres d'une fosse de plantation seront étudiés pour mettre en évidence ceux qui influent le plus sur la viabilité des arbres. Enfin, les résultats obtenus permettront de créer une discussion sur l'adaptabilité des fosses de plantation au sein de la CUGN.

## 1 - ETAT DE L'ART

---

L'organisation WWF estime à 1 million le nombre d'arbres qui meurent en Europe à cause du sel de déneigement tous les ans. Sur le territoire Français, suivant les années, la quantité de sel épandu varie entre 750 000 Tonnes et 1 650 000 Tonnes. En amont du projet, il est nécessaire d'effectuer une synthèse des différents travaux déjà réalisés sur ce sujet.

Le déneigement est-il toujours obligatoire et si oui quels sels utilise-t-on pour déneiger nos routes ? Quels impacts ont-t-ils sur le bord de ces routes ? Quelles autres solutions pourraient-être utilisées pour limiter les effets néfastes du sel tout en assurant les activités humaines ?

Cette analyse présente les objectifs de la CUGN à propos de l'utilisation du sel lors des périodes hivernales, l'impact général du sel sur le sol et les plantes ou encore un état des lieux des différentes alternatives aux sels classiques.

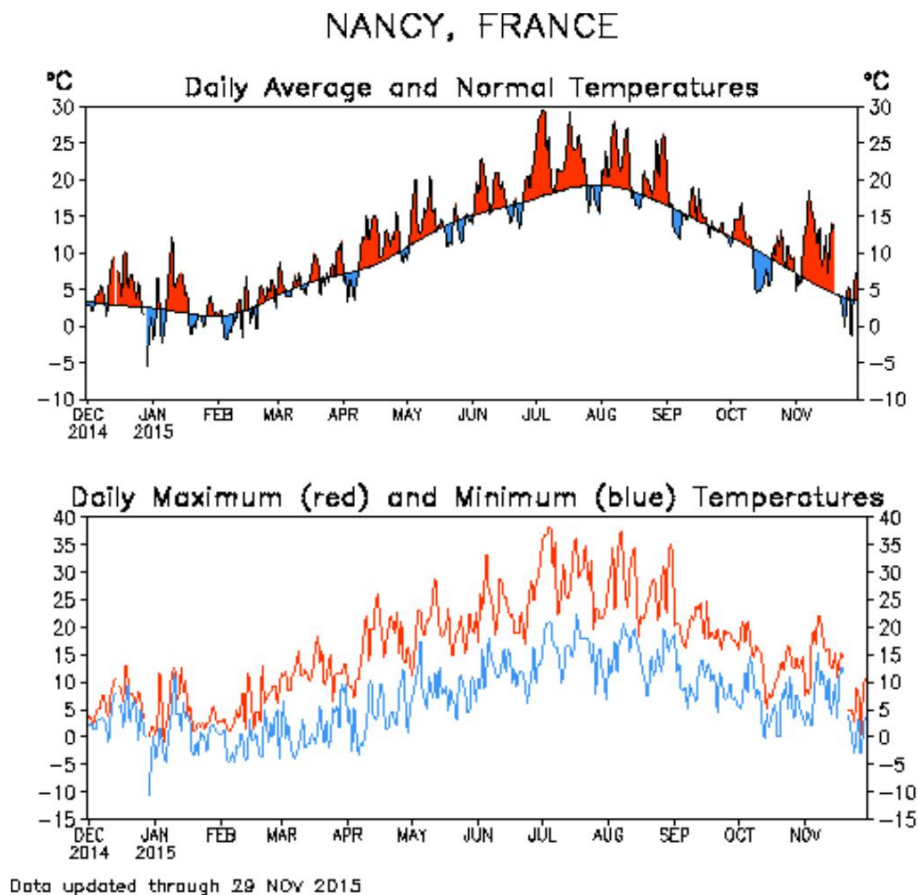
### 1.1 L'ENJEU DU DENEIGEMENT DANS LA COMMUNE DU GRAND NANCY

#### a) *Un climat nancéen*

Le grand Nancy est une communauté de commune regroupant 20 communes situées en Meurthe-et-Moselle.

Le climat y est de type océanique avec une influence continentale. Les températures sont donc très variables selon les saisons. Les hivers y sont froids avec présence de neige et de gel.

En effet, les moyennes réalisées entre les années 1971 et 2000 sur la station d'Essey Les Nancy montrent des températures minimales moyennes inférieures à 3°C de novembre à mars avec des températures minimales moyennes négatives en janvier et février (respectivement de -2.8°C et -0.8°C entre 1971 et 2000). [1]



**Figure 1 : graphiques des moyennes de températures à Nancy de l'année 2015 [2]**

**Tableau 1 : Représentation du nombre de jour de gel et de neige entre 1961 et 1990 à Essey Les Nancy [1]**

Nombre de jours avec :	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Neige	8	6.7	4.5	1.8	0.1	0	0	0	0	0.1	3.4	6.1
Gel	7.4	5.6	12.2	5.1	0.7	0	0	0	0.2	2.6	9.7	5.9

Comme le montre le tableau 1, il neige en moyenne 31 jours par an et il gèle environ 80 jours par an.

Cependant, on remarque un réchauffement climatique ces dernières années et la température a augmenté d'environ 1.6 degré en 20 ans. Ainsi il a neigé en moyenne 22 jours par an entre 2010 et 2014 (un pic de 54 jours de neige a été observé en 2010).

Ces conditions climatiques nécessitent donc des mesures spécifiques en hiver afin d'assurer la circulation et la sécurité des usagers et de ne pas impacter l'activité économique de la ville.

#### **b) Viabilité hivernale en Lorraine**

Face aux caractéristiques de ce climat Nancéen, un dispositif est mis en place chaque année à partir du 10 novembre jusqu'au 16 mars: il s'agit de la viabilité hivernale. C'est un dispositif de surveillance et de mise en œuvre de moyens afin de maintenir ou de rétablir de bonnes conditions de circulations pour les usagers et d'assurer la sécurité des utilisateurs de routes mais aussi de chemins publics.

En effet, 267 000 habitants vivent dans la communauté de commune du grand Nancy dont 187 000 sont classés en population active (entre 15 et 64 ans). De plus, dans cette même zone 141 000 emplois sont présents dans cette même zone. [3]

Il est donc important de maintenir des conditions de circulation permettant d'assurer la continuité des activités économiques de la ville ainsi qu'un trafic routier satisfaisant.

La viabilité hivernale comprend donc tous les moyens mis en œuvre afin d'assurer la sécurité routière et d'éviter l'accumulation de la neige et la présence de verglas grâce au déneigement ou à l'épandage de fondants.

Ce dispositif doit permettre de déneiger 800 km de voirie. Il existe une hiérarchisation des différentes voiries au sein du Grand Nancy. Ces 800 km comprennent 200km de voiries prioritaires (voiries présentant un fort trafic ou un trafic de transport en commun) ; 125 km de voiries en pentes et 475 km d'autres voiries.

Depuis 2007, en moyenne 6300 tonnes de sel ont été déversées par an par le Grand Nancy coûtant en moyenne de 1.71 million d'euros par an. [4]

Mais le bilan est très variable, en effet, en année douce comme en 2008, seulement 600 tonnes auront été épandues contre 11800 tonnes en 2010 avec un coût de respectivement 650 000 et 2,8 millions d'euros (une tonne de sel coûte entre 70 et 100 €). [5]

L'utilisation de ces produits permet donc le maintien de bonnes conditions de circulations.

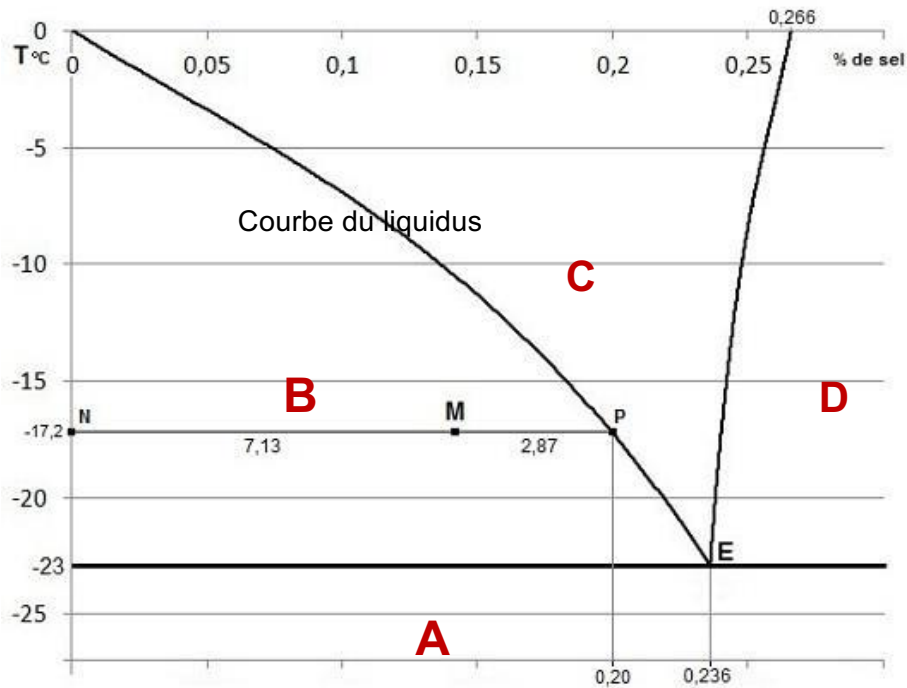
#### **c) Le déneigement en Lorraine**

Différents produits de dégels sont utilisés. Ils possèdent chacun des avantages et des inconvénients mais le produit le plus utilisé reste le chlorure de sodium (NaCl) car il est peu coûteux comparé aux autres produits et a prouvé son efficacité. C'est également un produit qui provoque des dégradations environnementales relativement faible comparé à des alternatives comme les acétates ou des chlorures d'autres sels.

Celle-ci repose sur le principe d'abaissement du point de congélation de l'eau.

Au niveau moléculaire, les ions du sel  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  interagissent avec les molécules d'eau, et diminuent les interactions entre les molécules :

Plutôt que de former une liaison hydrogène avec la molécule d'eau voisine, l'eau formera une liaison avec l'ion. Ces derniers vont donc perturber l'arrangement des molécules d'eau entre elles, réduisant la formation de structures symétriques propres à la glace.



- A : eau salée totalement solide
- B : mélange glace et eau salée liquide
- C : au-dessus du liquidus : eau salée liquide
- D : mélange sel et eau salée liquide
- E : point eutectique

Figure 2 : Diagramme binaire eau/sel [6]

## 1.2 L'IMPACT DU RECOURS AU SALAGE POUR LE DENEIGEMENT DES ROUTE

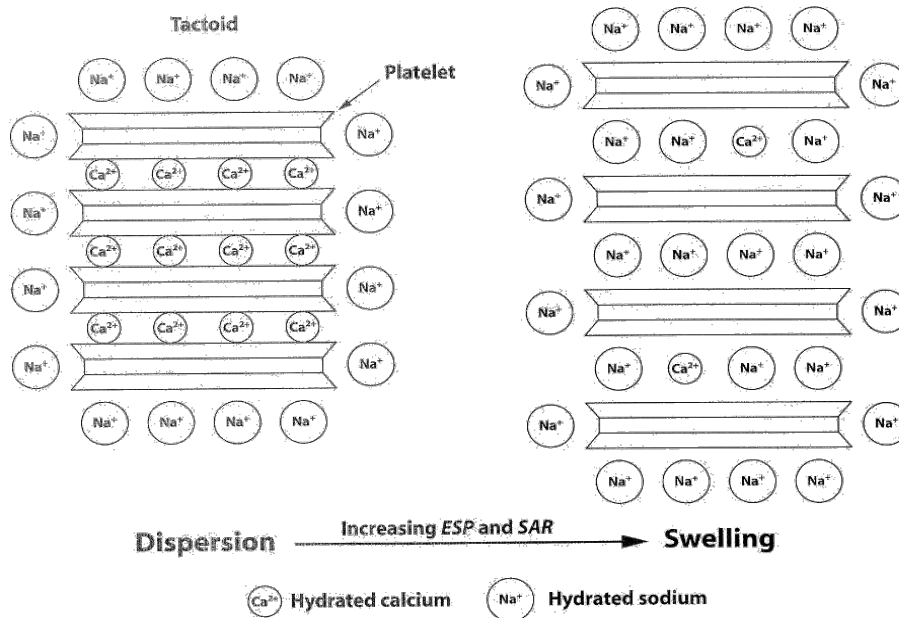
Commençons par rappeler que dans la suite de ce document le terme sel correspondra au chlorure de sodium ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ). Nous allons maintenant aborder deux principaux points : les effets qu'il a sur le sol en général, puis ceux qu'il a sur les végétaux.

a) **Impact du sel sur les sols urbains**

1.2.a..1 Généralités sur les sols urbains

Les sols urbains sont très souvent constitués de mélanges de terres issues du décapage superficiel de sols agricoles et de remblais issus de différents travaux de terrassement. Ils présentent donc généralement une grande hétérogénéité granulométrique et chimique (teneurs en matière organique et en éléments nutritifs, présence éventuel de contaminants). De plus, l'infrastructure spécifique environnant les sols urbains (imperméabilisation, dimension réduite des fosses de plantation...) modifie les échanges avec le milieu (eaux souterraines, atmosphère).

Des apports massifs en sel peuvent donc être à l'origine de perturbations dans les équilibres géochimiques des sols urbains.



Swelling : gonflement  
 Platelet : feuillet  
 Increasing : augmentation

**Figure 3 : action du sodium sur les argiles (d'après Essington, 2000)**

1.2.a..2 Impact du sel sur le sol

**DISPERSION ET GONFLEMENT DES ARGILES**

Le sol représente la couche superficielle de la croûte terrestre, résultant de la transformation et de l'altération de la roche mère, enrichie par des apports organiques. Le mélange de minéraux argileux et d'humus forme le complexe argilo-humique (CAH). Ces deux



éléments étant chargés électro-négativement, l'équilibre électrostatique est permis grâce à des cations compensateurs, majoritairement dans le sol  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2/3+}$  et  $\text{H}^+$ . Malgré le fait que les ions divalents sont plus énergétiquement retenus que les ions monovalents, lors des opérations de salages du réseau, la concentration en ions sodium dans le sol augmente nettement. Ces ions divalents sont ainsi remplacés par des ions sodiums entraînant des phénomènes de dispersion et de gonflement des argiles (Figure 2). Une fois dans le sol, les ions  $\text{Cl}^-$  provenant du  $\text{NaCl}$  sont eux lessivés vers les nappes phréatiques. Ce n'est pas le cas des ions  $\text{Na}^+$  qui vont réagir avec les particules chargées du sol. Les minéraux argileux présentent en effet une structure en feuillets, à la surface desquels les molécules d'eau peuvent s'adsorber, sous l'effet de différents phénomènes physico-chimiques, provoquant ainsi un gonflement, plus ou moins réversible, du matériau.

Dans le sol, les charges négatives provenant des groupements chimiques de la matière organique et des charges de surface des argiles constituent des sites d'adsorption des ions sodium. La sodisation correspond à l'adsorption des ions sodium sur le complexe argilo-humique.

La figure 3 met en évidence deux phénomènes : la dispersion et le gonflement des argiles qui dépendent de la position d'adsorption du sodium au niveau des argiles. L'ESP (Exchangeable Sodium Percentage) est définie comme étant le pourcentage de sodium échangeable dans le sol. Le SAR est le pourcentage d'ions sodium adsorbé sur les argiles, en pourcentage de la CEC (capacité d'échange cationique) soit par rapport à la quantité totale d'ions.

Lorsque l'ESP est inférieure à 10-15% les argiles vont avoir tendance à se disperser. Pour des valeurs supérieures c'est le phénomène de gonflement qui va influencer la structure du sol

#### 1.2.a..2.1 Alcalinisation du sol

L'augmentation du taux de sodium et surtout de sa proportion au sein du CAH (complexe argilo-humique) (>15 % d'ions sodium), conduit à l'augmentation du pH du sol qui peut atteindre 9, c'est l'alcalinisation. Ce phénomène est dû à la formation de carbonates de sodium. Lorsque le pH est très élevé, la matière organique peut se solubiliser formant ainsi les « salants noirs ». C'est un processus de dégradation des sols qui est difficile à éliminer car il faut utiliser des produits très acides pour augmenter la solubilité des carbonates de sodium et ainsi neutraliser le milieu [7] C'est un des processus importants de dégradation des sols.

#### **DIMINUTION DE LA PERMEABILITE DU SOL**

D'autres cations peuvent également s'adsorber sur les charges négatives des feuillets des argiles comme le potassium ( $\text{K}^+$ ), le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) ou encore le magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ). L'influence de la nature du cation adsorbé sur la floculation des argiles s'explique grâce au modèle la double couche. La double couche est l'environnement ionique autour des particules argileuses,

influencée par la charge négative des argiles. Elle est composée d'une couche de charges fixes et d'une couche diffuse. L'adsorption des ions sodium sur le complexe entraîne la désorption des ions calcium et magnésium divalents qui stabilisaient la structure des argiles. De plus les ions sodium ont une grande sphère d'hydratation, ils vont donc accroître la distance entre les feuillets adjacents qui se dispersent. La non floculation des argiles entraîne une diminution de la perméabilité du sol, la circulation de l'eau et de l'air est alors plus difficile. Le sol devient asphyxiant ce qui est défavorable au développement de la végétation. En outre, l'ajout d'ions  $\text{Ca}^{2+}$  ou même  $\text{Mg}^{2+}$  entraîne la précipitation sous forme de calcite ou de silicates magnésiens. Ces précipitations entraînent la diminution des éléments calcium et magnésium, nécessaires afin de maintenir une bonne structure des feuillets argileux et donc du sol.

## b) *Impact du sel sur les végétaux des terres pleins*

### 1.2.b..1 Impact du sel sur la nutrition des plantes

L'accumulation de  $\text{Na}^+$  sur la CEC se traduit par le lessivage des autres cations pouvant induire des phénomènes de carence. De plus, une modification des équilibres  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  peut également perturber l'assimilation du potassium par la plante.

### 1.2.b..2 Impact du sel sur la physiologie des végétaux

#### EFFET OSMOTIQUE

Une forte concentration de sel dans le sol rend difficile l'absorption de l'eau par le système racinaire, car il y a « compétition » pour l'eau entre le sol et la plante, par le jeu des pressions osmotiques des deux milieux. En présence d'une forte concentration de sel dans le sol, la pression osmotique de l'eau du sol est supérieure à la pression osmotique de l'eau contenue dans la plante.

L'effet osmotique va se traduire par un approvisionnement des plantes en eau moins important les exposant ainsi à un stress hydrique. En effet, l'eau se déplace toujours, dans la plante, des compartiments les plus concentrés (hypertonique) vers les compartiments les moins concentrés (hypotoniques) : l'eau va dans le sens des potentiels hydriques décroissants. Ainsi l'augmentation de la concentration en ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  dans la solution du sol va aller à l'encontre de l'absorption racinaire de l'eau.

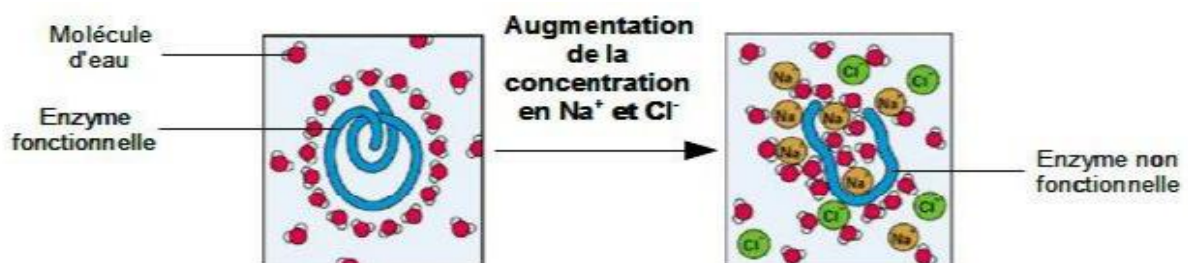


Figure 4 : déstabilisation des enzymes par le stress salin

Les plantes étant moins approvisionnées en eau, elles vont ainsi présenter des carences supplémentaires en éléments minéraux essentiels tel que les ions  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ... Le développement de la plante va donc être fortement compromis [8]

#### **TOXICITE IONIQUE**

Le peu d'eau prélevée dans le sol par les plantes va être fortement concentré en sel ce qui va donc se traduire par une élévation de la concentration en ions  $Na^+$  et  $Cl^-$  dans les compartiments intracellulaires et tout particulièrement dans les feuilles. Ce déséquilibre va induire un grand nombre de dysfonctionnements métaboliques dans les cellules. En effet, les ions  $Na^+$  et  $Cl^-$  vont, à fortes concentrations, déstabiliser la structure tertiaire des enzymes qui est essentielle pour les rendre fonctionnelles (Figure 4).

Au sein des membranes cellulaires, il existe des transporteurs d'ions  $K^+$  permettant leur entrée dans la cellule. Ces ions sont vitaux car ils sont impliqués dans la synthèse de protéines, l'activation de certaines enzymes, l'osmo-régulation, le maintien de la turgescence et la stimulation de la photosynthèse. Une forte concentration en  $Na^+$  va provoquer des phénomènes de compétition entre  $Na^+$  et  $K^+$  au niveau de ces transporteurs et dans les compartiments intracellulaires.

Ainsi de fortes concentrations de ces ions dans les chloroplastes vont provoquer une baisse de l'activité photosynthétique (impact sur le métabolisme du carbone et la photophosphorylation) [9]

#### **PERTURBATION DU MECANISME DE TRANSPIRATION FOLIAIRE**

En présence d'ions chlorure, les mécanismes qui se déroulent dans les feuilles peuvent aussi être perturbés. Les stomates restent ouverts aux heures les plus chaudes de la journée au lieu de se refermer afin d'éviter la transpiration foliaire. [10]

Lorsque la pollution saline est liée aux brouillards de sel, ces derniers vont avoir un effet direct sur le feuillage et toute la partie aérienne de l'arbre. Car ces embruns sont non seulement constitués de fines particules d'eau salée, mais contiennent également des microparticules qui peuvent avoir un fort pouvoir abrasif. La cuticule, fine couche imperméable qui protège la surface des feuilles et limite leur transpiration, peut être altérée et les ions toxiques ou des agents pathogènes peuvent pénétrer ainsi par le feuillage. De plus, ces projections sont souvent accompagnées de poussière ou même de sable résiduel pouvant nuire aux activités principales de ces organes : les feuilles endommagées peuvent perdre partiellement leur activité photosynthétique.

#### **EFFET SUR LE MATERIEL GENETIQUE**

La traduction des ARN<sub>t</sub> est également affectée par la présence du sodium. Ce mécanisme demande une concentration élevée en  $K^+$  afin que les ARN<sub>t</sub> se fixent aux ribosomes. Or lors d'un excès en sodium, la concentration en  $K^+$  est plus faible au sein du cytoplasme.

### c) Mécanismes de résistance chez les espèces halophytes

Les plantes résistantes au sel sont appelées halophytes : végétaux de bords de mer, de déserts, de marais ou de lacs salés par exemple. Il existe des plantes halophytes facultatifs qui supportent de fortes concentrations de sel mais vivent habituellement sur des sols peu salés, et les halophytes obligatoires (euhalophiles) qui ont besoin de beaucoup de sels pour se développer (ex : salicorne en Camargue). [11]

Dans la problématique des arbres de la CUGN, nous nous intéresserons aux halophytes facultatifs qui peuvent arborer les bords de routes.

Les arbres halophytes facultatifs peuvent supporter de grandes teneurs en chlore foliaire sans pour autant présenter des signes de dessèchement ou de dégradation.

Certaines espèces sont peu sensibles, car elles présentent peu de symptômes et des teneurs en chlore faibles, même pour une forte exposition, comme le chêne vert : la cuticule de ses feuilles sont épaisses et recouvertes d'une substance cireuse qui limite leur dégradation et la pénétration de chlore supplémentaire par contact aérien.

Une autre forme de résistance au sel est l'élimination des ions toxiques comme  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  en les accumulant dans les feuilles juste avant qu'elles tombent ce qui diminue la charge globale en sel dans la plante. Cette technique est utilisée par l'érable à sucre (*Acer saccharum*).

Pour plusieurs espèces dont le marronnier et le platane, des études ont montré que les ions toxiques ont tendance à s'accumuler dans les tissus ce qui nuit à la plante année après année sans moyen de se purifier. [12]

**Tableau 2 : Différents exemples d'espèces d'arbres résistantes ou non au sel [12]**

Espèces tolérantes au NaCl	Espèces moins tolérantes au NaCl
Ailante ( <i>Ailanthus altissima</i> ) Bouleau ( <i>Betula</i> ) Cerisier à grappes ( <i>Prunus padus</i> ) Chêne ( <i>Quercus</i> ) Févier ( <i>Gleditsia triacanthos</i> ) Frêne commun ( <i>Fraxinus excelsior</i> ) Ginkgo biloba (+ résistante à la pollution) Noyer noir ( <i>Juglans nigra</i> ) Robinier faux-acacia ( <i>Robinia pseudoacacia</i> )	Erable sycomore ( <i>Acer pseudoplatanus</i> ) Hêtre ( <i>Fagus sylvatica</i> ) Marronnier blanc ( <i>Aesculus hippocastanum</i> ) Noisetier de Byzance ( <i>Corylus colurna</i> ) Peuplier blanc ( <i>Populus alba</i> )

### 1.3 LES ALTERNATIVES POUR LIMITER CET EFFET NEGATIF

Certains moyens ont été mis en place pour pallier aux effets négatifs du sel sur la flore urbaine. Afin de protéger les plantations des projections de sel par le passage des voitures il est possible de mettre en place une protection physique de ces plants. L'aménagement des plantations peut également permettre de limiter la dispersion du sel sur la surface des terres pleins. Enfin, il existe d'autres alternatives à l'utilisation du sel qui ont fait leur preuve dans certaines villes de France.

#### a) *Protection physique des plants*

Le sel a notamment pour effets de créer des lésions au niveau des troncs des arbres ou de "brûler" les feuilles des végétaux. Pour pallier ce problème, il est possible de protéger physiquement les plants en mettant en place des murets permettant d'atténuer les projections de sel ou d'autres polluants au niveau des terres pleins. Il est également possible de protéger les troncs avec des toiles de joute, des cannisses mais aussi des nattes de jonc.

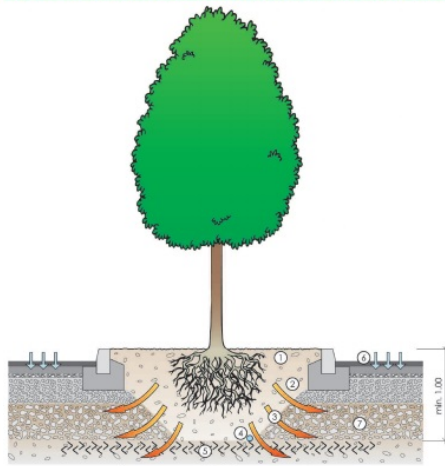
Pendant ces types de protections ne sont pas systématiquement présents en ville et impliquent des coûts de mise en œuvre supplémentaires. De plus, l'aménagement des plants peut également permettre de les protéger physiquement. En effet, il est possible de mettre en place une bordure de végétaux denses tolérants au sel entre la route et d'autres plantes ou arbres qui y sont plus sensibles.

#### b) *Aménagement des fosses de plantation*

La fosse de plantation est l'espace souterrain qui permet l'ancrage et l'alimentation hydrique et minérale des arbres. Le volume de la fosse de plantation varie selon l'espèce d'arbre plantée et selon le type de sol. En effet dans le cas d'un sol riche en éléments nutritifs la fosse peut être réduite à quelques m<sup>3</sup> tandis que dans un sol plus pauvre, le volume de substrat apporté devra être plus important. La profondeur de la fosse peut aussi varier entre 1 m et 1,50 m selon le développement racinaire des espèces plantées.

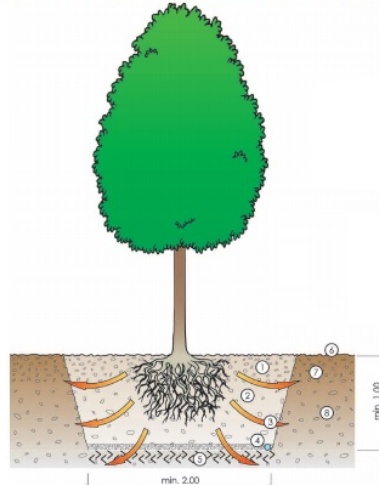
Lorsque le sol a tendance à être imperméable, une couche drainante est mise en place au fond de la fosse. De plus, des mélanges de type terre-pierre sont couramment utilisés afin de permettre le maintien d'une certaine porosité du sol tout en assurant l'ancrage et l'alimentation des arbres. Le diamètre des pierres optimal est compris entre 40 et 120 mm. Ce type de mélange est généralement couplé à un système d'arrosage spécifique des arbres permettant un apport d'eau directement en profondeur. [13]

### Fosse de plantation en mélange terre-pierres avec extension sous les revêtements poreux



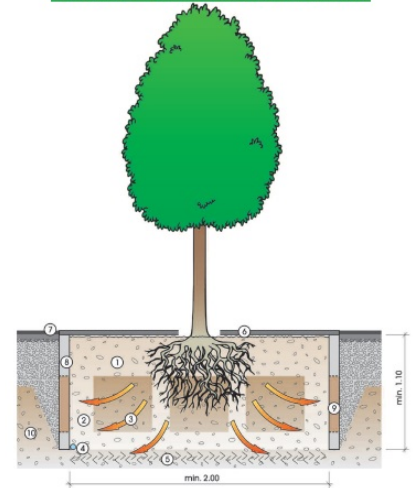
1. terre végétale amendée
2. sous-couche arable
3. prospection racinaire
4. drainage éventuel
5. sous-sol décompacté
6. revêtement perméable
7. mélange terre-pierres

### Fosse de plantation en pleine terre



2. sous couche arable
3. prospection racinaire
4. drainage éventuel
5. sous sol décompacté
6. surface végétalisée
7. terre végétale en place
8. sous couche

### Fosse de plantation en béton



1. terre végétale amendée
2. sous-couche arable
3. protection racinaire
4. drainage éventuel
5. sous-sol décompacté
6. grille de protection sur support
7. revêtement de surface
8. caisson de plantation ajouré
9. ouverture du caisson
10. terrain naturel

Figure 5 : Les trois grands types de fosses de plantation [13]

Trois grands types de fosses de plantation d'arbres existent. Les fosses de plantation en béton permettent une meilleure protection des arbres vis-à-vis du sel. En effet la présence de grilles de protection au niveau de la surface de la fosse permet de limiter l'infiltration du sel dans le sol. Les fosses de plantation en pleine terre ne permettent pas une protection du sol vis-à-vis du sel cependant celui-ci étant dissout dans une plus grande surface de terre cela limite le phénomène de concentration des ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  dans le sol contrairement aux fosses limitées par des caissons étanches.

### c) *Utilisations d'alternatives au sel*

#### 1.3.c.1 Dénéigement mécanique

#### UN EPANDAGE CONTROLÉ DU SEL

Il existe des dispositifs de salage qui utilisent des thermomètres infrarouges afin d'épandre plus ou moins de sel en fonction de la température du sol.

Cela permet d'économiser de 20 à 25 % de la quantité de sel utilisée sans affecter la sécurité routière.

#### LE RACLAGE

Le raclage permet d'éliminer la neige de la chaussée en réduisant l'utilisation de produits chimiques. Cette technique entraîne généralement une réduction des dépenses tout en protégeant l'environnement et la chaussée des agressions. Lors du raclage, la neige est désolidarisée du

revêtement puis déplacer hors de la chaussée en essayant de réduire les gènes. Différents outils fixés sur un véhicule sont utilisés : [14]

- **Le rabot tracté ou poussé** : Il est fixé à l'avant ou à l'arrière du véhicule et est constitué d'une lame simple en matière synthétique ou acier. Il est de moins en moins utilisé.
- **La lame biaise** : Elle est fixée à l'avant mais se distingue du rabot par la présence d'une lame d'usure permettant de rendre l'objet plus durable.
- **L'étrave fixe** : Elle est composée de deux lames fixes disposées en “ ^ ” poussant la neige de part et d'autre du véhicule.
- **L'étrave transformable** : Elle suit le principe de l'étrave fixe mais les deux lames peuvent être transformées en lame biaise ou en V.



Figure 6 : Lame biaisée



Figure 7 : Etrave fixe

Cependant le raclage possède des limites : sur une route bien lisse, le raclage peut être parfait et enlever la totalité de la neige, mais, plus la qualité de la chaussée se dégrade (dévers ou trou) moins le raclage sera bon. Il existe des lames oscillantes qui peuvent palier certaines aspérités. Cette technique est donc souvent utilisée sur des grands axes et avec des neiges froide et sèche se décollant aisément de la chaussée. [15]

#### LES SOUFFLEUSES/FRAISEUSES A NEIGE

Ce sont des machines qui disloquent la neige à l'aide d'une fraiseuse et l'entraîne vers une turbine soufflante la projetant sur le bas-côté. Cette technique est uniquement utilisée pour débayer de grandes quantités de neige. [14]



Figure 8 : Souffleuse à neige

### 1.3.c..2 Produits fondants alternatifs

Agents déglaçants et abrasifs	Température eutectique <sup>1</sup> (°C)	Comparaison de coût par rapport au NaCl
Chlorure de sodium (NaCl)	-21	1
Chlorure de calcium (CaCl <sub>2</sub> )	-55	17x
Chlorure de magnésium (MgCl <sub>2</sub> )	-33	7x
Chlorure de potassium (KCl)	-10	4x ou plus
Formiate de calcium-sodium	-12	17x
Acétate de calcium-magnésium (ACM)	-15/-30	35x
Éthylène glycol	-51	28x
Méthanol	-98	10x
Propylène glycol	-57	28x
Urée	-12	7x
Mélange de MgCl et NaCl et mélange de CaCl <sub>2</sub> et NaCl	-10 à -35	Dépend du mélange et des proportions
Gravier, sable, litière	toutes températures (adhérence à la route)	—

**Figure 9 : Température eutectique et coût des différents fondants et abrasifs [14]**

D'autres produits fondants peuvent être utilisés à la place du NaCl. [14] mais lourde de conséquences résume les température eutectique et coût des différents fondants et abrasifs. La température eutectique est la température à laquelle la solution est constituée d'un mélange de solide liquide, au-dessus de cette température on observe une liquéfaction et en dessous une solidification.

#### LES CHLORURES [15]

**CaCl<sub>2</sub>** : C'est un produit qui a un impact moindre sur les végétaux, comparé au NaCl. Sa fabrication est plus complexe et une fois déshydraté, il se réhydrate très facilement au contact d'humidité ce qui entraîne des difficultés de conservation. Il est 50 % plus efficace que le NaCl dans des conditions optimales. Son utilisation peut se justifier pour des neiges sèches ou des taux d'humidité très faible car en présence d'eau, on observe la création d'une saumure de Calcium qui du fait de sa viscosité élevée est très glissante. Son utilisation est donc déconseillée en traitement préventif prolongé. Sa température de recristallisation est de -50°C, il peut donc être utilisé en cas de forte gelée ponctuelle et par temps sec. Cependant son coût limite son utilisation.

**MgCl<sub>2</sub>** : Il est encore plus hygroscopique que CaCl<sub>2</sub> son utilisation et son stockage sont très compliqués et entraînent de forts coûts. Il est très corrosif et son point de cristallisation se situe à -33°C.

**KCl** : Il n'est quasiment pas utilisé et possède un point de fusion de l'ordre de -10°C, supérieur à celle de NaCl.

Les chlorures ont un très bon rapport coût efficacité mais sont corrosifs en l'absence de traitements spécifiques. Ils sont pour cela couplés à des inhibiteurs de corrosion.



## LES ACETATES [14]

Ce sont des fondants non corrosifs puisqu'ils sont couplés à des inhibiteurs de corrosion. Ils ont un très fort pouvoir fondant mais sont relativement chers. Ils sont utilisés sur des zones sensibles comme les aéroports.

**Acétate de calcium-magnésium (AMC)** : Bilan très négatifs sur l'environnement. Il ne dégèle pas mais empêche la neige de geler ou de se compacter. Il est utilisé plus généralement en préventif.

## LES FORMIATES [14]

Ce sont des dérivés d'acétates possédant le même pouvoir fondant que ces derniers et étant tout aussi cher mais ayant la particularité d'être peu nocifs pour l'environnement. En surface, ils sont détruits au bout de 3 jours et au bout de 90 jours dans le sol. Il existe des formiates de Potassium et de Sodium.

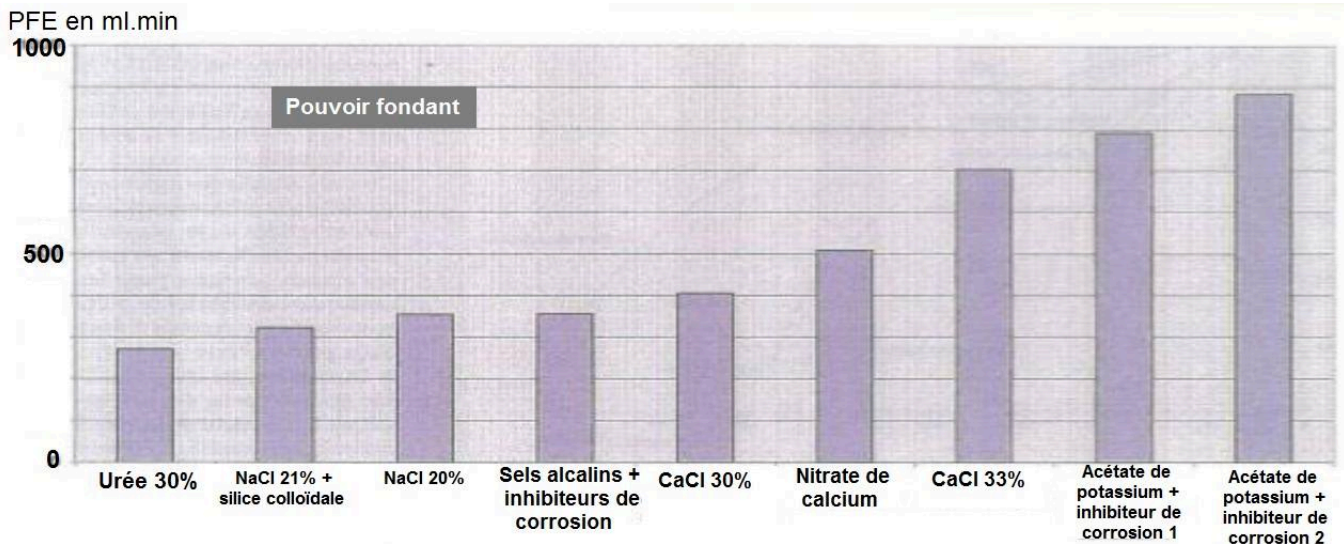


Figure 10 : Efficacité (en haut) et impacts environnementaux (en bas) de différents fondants [17]

## AUTRES COMPOSES ORGANIQUES

**Urée technique** : Ils sont non-corrosifs et possèdent un pouvoir fertilisant. Malheureusement, en hiver, il y a une baisse de la demande en azote ce qui entraîne une surfertilisation et donc une consommation très importante d'oxygène pour sa dégradation. De plus, il n'est pas très efficace à des températures très faibles.

**Les alcools (glycol, éthanol, ...)** : ces produits coûtent relativement chers et leur efficacité est limitée. De plus, leur dégradation entraîne comme pour l'urée technique une forte consommation en oxygène. Ils sont non-corrosifs et sont donc généralement utilisés dans les aéroports.

## **SAUMURAGE**

La saumure est un mélange de sel et d'eau. Il permet de diminuer la quantité de sel de déneigement utilisée jusqu'à 30%. Les saumures sont obtenues par mélange de sels solides et d'eau. Elles sont généralement utilisées par temps sec sur des neiges sèches car pour agir, les sels classiques ont besoin d'être en solution. Les saumures sont efficaces en première utilisation mais sont rapidement diluées une fois que la neige fond. On utilise presque uniquement des saumures de NaCl. En raison d'une recristallisation à basse température, il est utilisé pour des températures supérieures à -4°C.

## **LA CENDRE**

La cendre favorise la fonte de la neige car elle accumule la chaleur du soleil. Elle s'utilise dans le cas où les températures sont relativement douces.

## **MELANGE SEL/SABLE**

L'utilisation d'un mélange de sel et de sable est une technique employée par la ville de Sceaux. Elle permet de diminuer l'usage du sel de déneigement au niveau des voies de transit empruntées par les lignes de transport en commun et des zones piétonnes. Cela vise à inciter les habitants à privilégier les modes de circulation alternatifs à la voiture. [16]

## **LUTTE PAR CHAUFFAGE DES ROUTES**

Au Canada, en Islande, en Suisse, au Japon ou aux Etats-Unis, des câbles contenant un liquide caloporteur peuvent être posés sous la route pour permettre de réchauffer la chaussée et de faire fondre la neige. Cette technique est très coûteuse en énergie. Dans le cas de l'Islande, qui possède une énergie géothermique abondante, de l'eau est chauffée en profondeur et circule ensuite en circuit fermé dans certaines routes. L'installation de ce système reste cependant très complexe, coûteuse et est très peu répandue. Au Royaume-Uni, L'entreprise ICAX propose un système comportant des panneaux solaires sur des bâtiments et dans la route qui produit de l'énergie en été mais qui en hiver chauffe la chaussée par des câbles caloporteurs. Ce système est utilisé pour chauffer des parkings d'établissement public ou de grandes surfaces par exemple. [18]

### 1.3.c..3 Autres techniques visant à améliorer l'adhérence des routes

#### LES AUTRES ABRASIFS

Il est possible d'utiliser des gravillons ou de la pouzzolane qui forment un revêtement de surface permettant une meilleure adhérence des véhicules sur la route. Cependant, une fois qu'il n'y a plus de neige ces abrasifs doivent être récupérés, ce qui ajoute des coûts de fonctionnement non négligeables.

#### MAINTIEN D'UNE ROUTE BLANCHE

Cette technique est utilisée dans les pays nordiques où des lames sont utilisées afin de maintenir l'uniformité et la compacité relative de la neige sur la route. La fine couche de neige laissée sur la route permet de maintenir une bonne adhérence. Le contexte est très important puisque dans ces pays les voitures sont souvent équipées en conséquence pour faire face à la neige et la conduite sur neige est bien maîtrisée par les habitants.

Il est également possible d'utiliser des abrasifs mouillés à l'eau chaude (90°C). L'eau a un bref effet de fusion puis le mélange sable et eau gèle en surface sous forme grumeleuse donnant une surface de type papier sablé. La durée du traitement antidérapant est sensiblement supérieure à la méthode traditionnelle. [19]

#### LE STOP GLISS BIO

L'utilisation de copeaux de bois une solution en plein développement. Cette technique a inspiré le Stop Gliss Bio® qui est utilisé comme antidérapant en Suisse. Ce sont des copeaux de bois imprégnés de fondants routiers dits écologiques qui favorisent l'adhérence des piétons et la fonte de la neige. Son utilisation est modérée car un seul épandage est suffisant pendant 5 jours (contre plus de 3 épandages par jour pour le sel). De plus il est utilisable jusqu'à -45°C. Néanmoins c'est une technique très onéreuse, et pose de nombreux problèmes techniques (stations d'épuration et canalisations bouchées).

## 2 - ETUDE DES SOLS DES FOSSES DE PLANTATION

L'objectif de cette étude est de déterminer quelles infrastructures permettent de limiter au maximum les effets néfastes du sel de déneigement sur le sol et donc de déterminer les caractéristiques idéales d'une fosse de plantation face aux contraintes de la viabilité hivernale. Pour répondre à cet objectif deux campagnes de prélèvements de terre ont été réalisées avant et après la saison hivernale. Les prélèvements ont été réalisés sur l'ensemble de la CUGN, afin d'être représentatif des différents types de fosses de plantation. Au niveau de chaque fosse différents paramètres ont été observés : le type de recouvrement, l'exposition au sel (double ou simple), l'imperméabilisation du sol, la hauteur du trottoir et la distance à la route. De plus, des analyses chimiques ont été réalisées au laboratoire pour mesurer le pH, la conductivité et l'ESP. Une analyse statistique a été menée afin de déterminer le lien entre l'infrastructure de la fosse et les caractéristiques du sol.

### 2.1 PRELEVEMENTS DES ECHANTILLONS

Des prélèvements ont été réalisés sur 38 sites répartis dans la CUGN avant et après les épandages de sels.

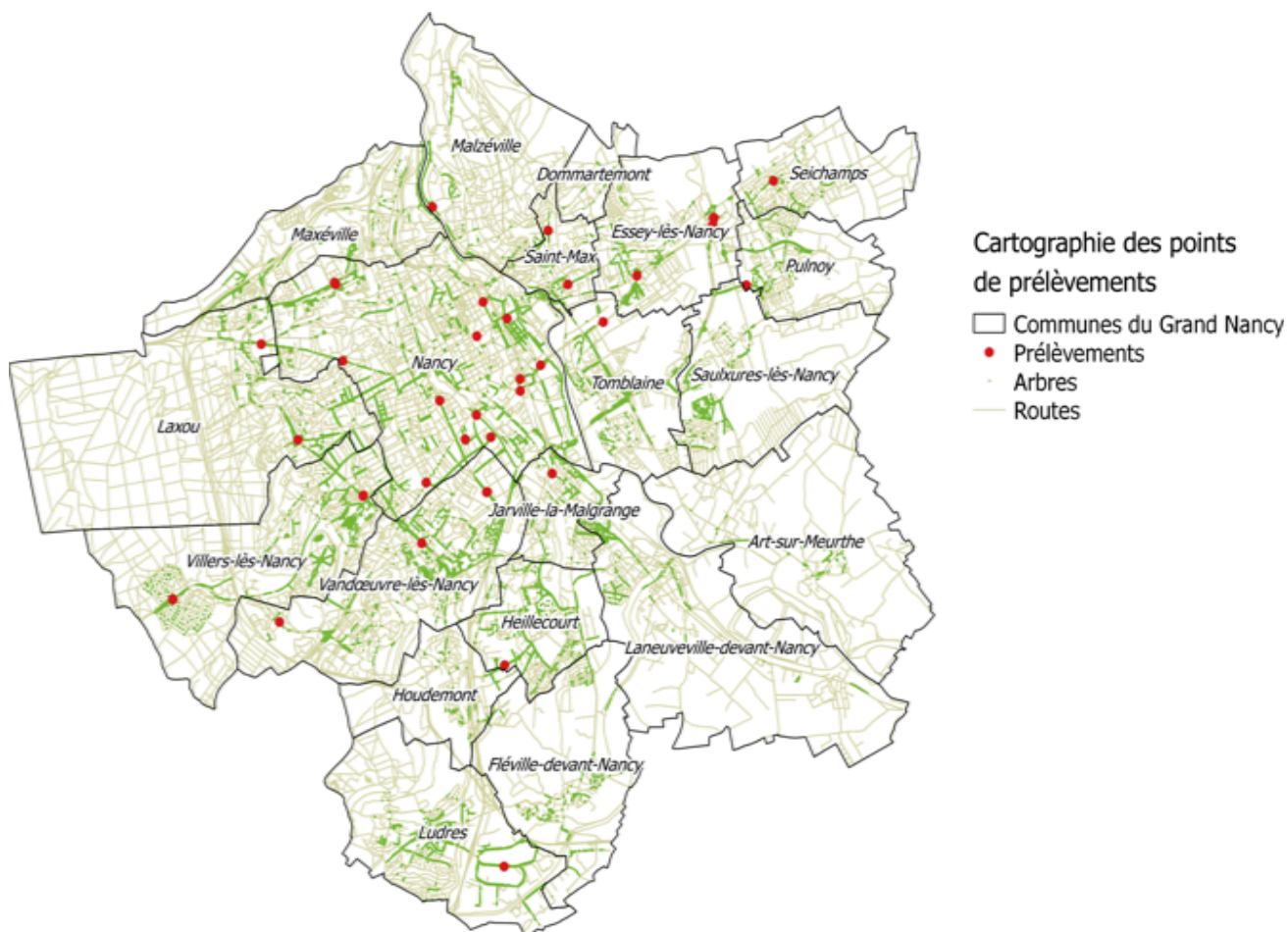


Figure 11 : Carte du Grand Nancy avec les différents points de prélèvements

Chaque point de prélèvement est composé d'un échantillon de surface (0-20 cm) et de profondeur (20-40 cm). Les échantillons de surface et de profondeurs sont eux-mêmes composés de 3 échantillons issus d'un même lieu.

On obtient donc 38 échantillons de surface et 38 échantillons de profondeur.

Tous les échantillons ont été mis à l'étude et tamisés à 2mm.

Ils ont ensuite été mis dans des sachets hermétiques afin d'être utilisés ultérieurement pour le calcul de la CEC, du pH et de la conductimétrie.

	Argiles A	Limons fins LF	Limons grossiers LG	Sables fins SF	Sables grossiers SG	Éléments grossiers
	<b>Argiles</b>	<b>Limons totaux</b>		<b>Sables totaux</b>		
Taille des particules (µm)	0 - 2	2 - 20	20 - 50	50 - 200	200 - 2000	> 2000

**Tableau 3 : Classes granulométriques correspondant à la norme française NF P18-560**

## 2.2 CALCUL DE LA CEC

### OBJECTIF

L'argile et l'humus sont associés en complexes argilo-humiques qui sont capables d'adsorber des cations ainsi que des anions.

La fixation de ces ions sur les complexes est réversible et s'équilibre en fonction de la concentration en ions de la solution du sol.

Déterminer la CEC d'un sol permet ainsi de traduire la capacité de stockage de cations d'un sol.

### PRINCIPE

Afin de déterminer la CEC nous utilisons la méthode de la cobaltihexamine : l'ion cobaltihexamine vient saturer le complexe.

Cette méthode est adaptée car elle permet de limiter l'action du réactif sur le calcium des carbonates ainsi que de travailler au pH du sol. La détermination de la CEC repose sur un dosage.

En effet, les ions cobalt  $\text{Co}(\text{NH}_3)_6^{3+}$  en solution sont colorés. De plus, ceux-ci possèdent une forte capacité d'échange avec les ions adsorbés sur les complexes argilo-humiques.

Ainsi, en déterminant la différence de concentration entre une solution initiale de cobaltihexamine et cette même solution après mise en contact avec le sol, par une mesure d'absorbance, nous pouvons déterminer la quantité d'ions échangés et donc la capacité du sol à adsorber des cations.

## DETERMINATION EXPERIMENTALE DE LA CEC

### Préparation des échantillons :

#### *Réactifs et matériel :*

- échantillons de terre séchés et tamisés à 2 mm
- eau distillée
- solution mère de chlorure de cobaltihexamine (0.0166 mol/L)
- flacons avec couvercle de 100 mL pour l'extraction et de 60 mL pour la filtration
- seringues de 10 mL et filtres seringues de maille 0.45 $\mu$ m
- balance de précision
- agitateur par retournement

#### *Protocole :*

Peser exactement environ 2.5 g de terre de chaque échantillon et les mettre dans les flacons d'extraction de 100 mL.

Ajouter exactement 50 mL de la solution de cobaltihexamine dans chaque flacon.

Agiter pendant 1 heure les flacons à l'aide d'un agitateur par retournement.

Les laisser décanter quelques minutes puis les filtrer à l'aide des seringues et des filtres seringue.

Recueillir les filtrats dans les flacons de filtration puis effectuer les dosages.

Réaliser en parallèle une solution de blanc d'extraction en filtrant la solution mère.

### Dosage colorimétrique :

#### *Réactifs et matériel :*

- solution mère de cobaltihexamine à 0.0166 mol/L (PM= 267.48 g/mol)
- eau distillées
- filtrats de sol obtenus précédemment
- fioles jaugées de 25 mL
- flacons de 40 mL pour conserver les étalons
- pipette en verre graduée de 5, 10 et 20 mL
- pro pipette
- pipette pasteur
- lunettes de protection (la cobaltihexamine est toxique)
- cuves en plastique et portoir pour spectrophotomètre

#### *Protocole :*

On réalise le dosage des ions cobalt en solution à 475 nm et à 380 nm (cela permet de corriger l'interférence de l'absorption des radiations à 475 nm par la matière organique contenue dans le solution).

La correction de cette interférence de fait en utilisant la formule suivante :

$$DO_{\text{ions cobalt}} = (DO_{475\text{nm}} \text{ de la solution d'essai} - X * DO_{380\text{nm}} \text{ solution d'essai}) * Y / (Y-X)$$

$$\text{Avec } X = DO_{475\text{nm}} \text{ solution échantillons} / DO_{380\text{nm}} \text{ échantillons}$$

$$Y = DO_{475\text{nm}} \text{ solution cobaltihexamine} / DO_{380\text{nm}} \text{ solution cobaltihexamine}$$

Dans un premier temps, réaliser une courbe étalon.

Pour cela préparer une gamme de concentration de 0, 20, 40, 60, 80 et 100% de la solution mère de cobaltihexamine dans des fioles de 25 mL. Homogénéiser.

Mesurer l'absorbance à 475 nm de la gamme préparée en procédant de la moins concentrée à la plus concentrée.

Relever ainsi l'absorbance à 475 nm des solutions de la gamme en fonction de la concentration en cobaltihexamine et l'absorbance à 380 nm de la solution étalon pure.

Tracer la courbe étalon.

En déduire la valeur de Y

Mesurer l'absorbance à 475 nm et à 380 nm de chaque échantillon.

En déduire la valeur de l'absorbance corrigée à 475 nm.

A l'aide de la courbe étalon déterminer la concentration en cobaltihexamine dans chaque extrait de sol.

En déduire la CEC exprimée en  $\text{cmol}^+$  par kg de sol sec.

## 2.3 CALCUL DU PH ET DE LA CONDUCTIVITE

### OBJECTIF

On souhaite déterminer l'impact de l'épandage de sel NaCl sur l'évolution du pH et de la conductivité des sols des fosses de plantations.

### PRINCIPE

En même temps que les cations métalliques, des ions  $\text{H}^+$  sont fixés sur le complexe argilo-humique. Ces ions  $\text{H}^+$  sont fixés en équilibre avec les ions  $\text{H}^+$  libres dans la solution du sol ; Le pH d'un sol est la mesure de la quantité d'ions  $\text{H}^+$  libres dans la solution :

$\text{pH} = \log[\text{H}^+]$  Il représente l'acidité actuelle du sol. Les ions  $\text{H}^+$  fixés représentent l'acidité potentielle du sol.

La mesure de la conductivité d'un sol avant et après épandage de sel permet de connaître l'évolution de la quantité d'ions salins dans le sol. Elle dépend de sa concentration en ions, et de la nature des ions présents

## DETERMINATION EXPERIMENTALE DU PH AQUEUX

### *Réactifs et matériel :*

- Echantillons de terre
- Eau distillée
- Solution étalon à  $\text{pH}=3$  et  $\text{pH}=7$
- Cuillère doseuse
- Flacon sérum en verre de 125 ml
- Centrifugeuse
- Filtres à  $0.45\mu\text{m}$
- pH mètre
- Conductimètre
- Balance de précision

### *Protocole :*

Peser 2 fois 5ml de terre de chaque échantillon avec une cuillère doseuse et les placer dans un flacon sérum en verre de 125mL

Ajouter 50mL d'eau distillée

Agiter 1h

Laisser reposer pendant 1h sans ouvrir le flacon

Centrifuger à 8000 tours/min pendant 8 min

Filtrer à  $0.45\mu\text{m}$

Mesure du pH avec un pH-mètre et de la conductimétrie avec un conductimètre après étalonnage préalable.

Les échantillons n'ont pas besoin d'être filtrés pour en mesurer le pH mais cette condition est nécessaire pour la mesure par conductimétrie. Par soucis de temps, tous les échantillons sont centrifugés pour réaliser les deux mesures en même temps.

## 2.4 DOSAGE DES IONS DU SOL PAR ICP-AES

### OBJECTIF

On souhaite déterminer la concentration en ions du sol :  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$

### PRINCIPE

La spectrométrie atomique à plasma à couplage inductif ou ICP (Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectroscopy) est une méthode d'analyse chimique qui permet de doser la quasi-totalité des éléments simultanément, en l'occurrence les ions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  dans les échantillons de terre. Les échantillons solides sont dissous dans une solution de cobaltihexamine (même préparation que pour les mesures de CEC), puis un plasma d'argon, qui est un gaz atomique neutre mais très ionisé chauffé à haute température (8000K), permet d'exciter des ions recherchés. Les éléments sont alors excités thermiquement qui peuvent être quantifiés par spectrométrie à émission optique (séparation par longueur d'onde). Les résultats sont analysés directement par l'ordinateur.



### 3 - RESULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1 ANALYSE DE L'ACP

##### PRINCIPE

Durant ces deux dernières années, 4 séries de prélèvements ont été réalisées avant et après hiver : novembre 2014, avril 2015, novembre 2015 et avril 2016

La méthode ACP (Analyse en Composante Principale) est une méthode statistique qui permet d'analyser simultanément un grand nombre de variables qualitatives et quantitatives qui correspondent aux propriétés physico-chimiques des échantillons de terre. Cette technique a pour but de déterminer s'il y a ou non corrélation entre ces différentes variables.

##### RESULTATS

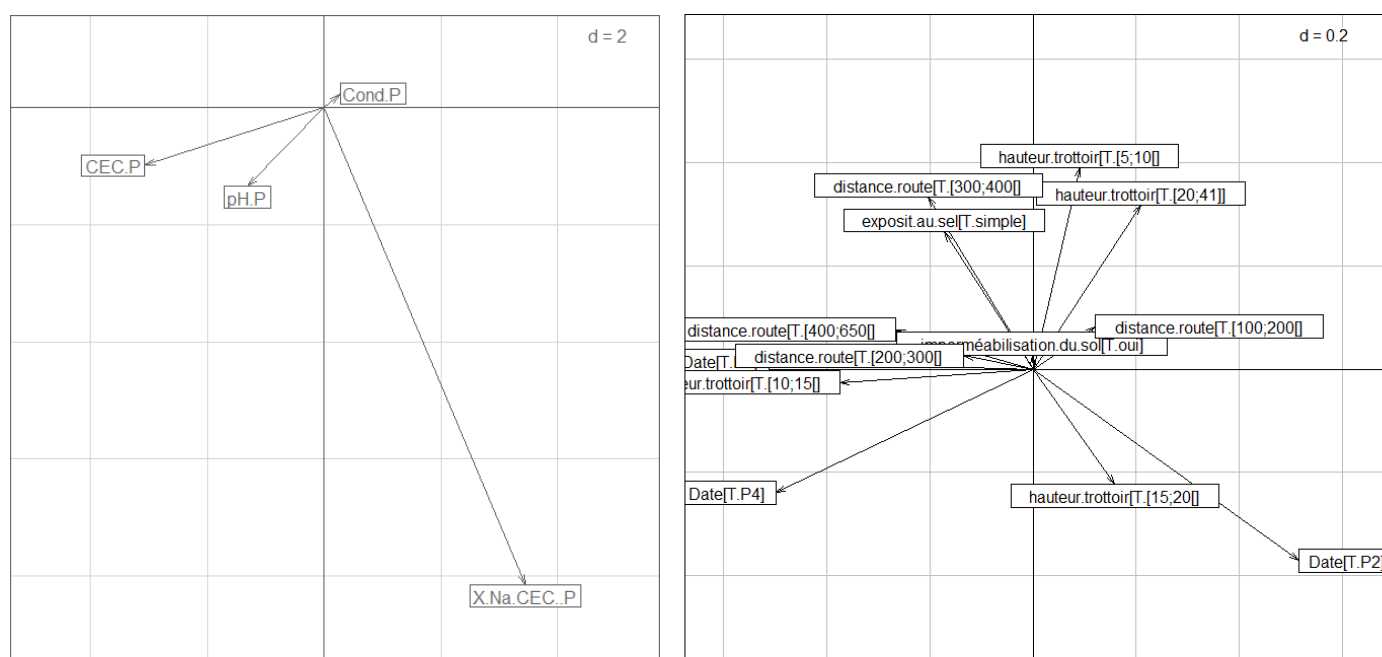


Figure 12 : Résultats d'ACP pour les échantillons de profondeur (à gauche, les données quantitatives, à droite les données qualitatives)

D'après les deux graphiques, on constate que la variable  $\text{Na}^+/\text{CEC}$  et la série de prélèvements 2 (Date [T.P2] ) sont fortement corrélées. Cela montre bien que l'hiver 2014/2015 étant plus rigoureux et l'épandage de sel fût plus important. De plus, le rapport  $\text{Na}^+/\text{CEC}$  en profondeur est anti-corrélé aux grandes distances à la route : plus la fosse est éloignée de la route, moins le sol est impacté par le sel (les projections atteignent moins la fosse). Enfin, ce rapport est également anti-corrélé avec le fait que l'exposition au sel soit simple, ce qui est cohérent : un double épandage de sel aura un plus grand impact sur la concentration en  $\text{Na}^+$  dans le sol qu'un simple épandage.

En revanche, la hauteur du trottoir ne semble pas être une variable déterminante, c'est pourquoi nous ne l'analyserons pas plus par la suite.

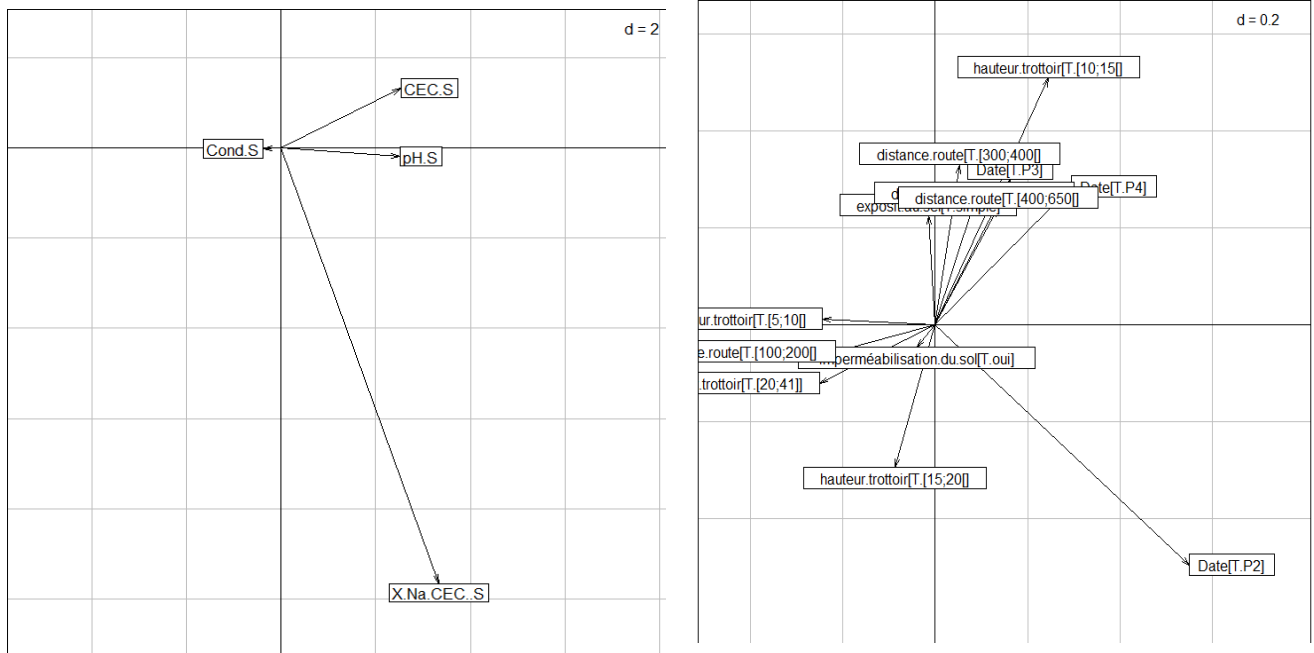


Figure 13 : Résultats d'ACP pour les échantillons de profondeur (à gauche, les données quantitatives, à droite les données qualitatives)

D'après les résultats de l'ACP ci-dessus, nous constatons également que le prélèvement 2 impact fortement la saturation en sel du sol. On remarque également une augmentation du pH entre les prélèvements 3 et 4 puisque le vecteur du prélèvement 4 se rapproche du vecteur du pH. Ceci semble logique et peut être le résultat du salage. Là encore, les vecteurs caractéristiques de grande distance à la route sont anti-corrélés avec la saturation en sel de la CEC.

A partir de ces observations, une étude approfondie a été effectuée sur certains paramètres déterminants par la méthode des boxplots.

### 3.2 ANALYSE DES BOXPLOTS

#### PRINCIPE

Les premières analyses visent à comparer les valeurs de pH, de conductivité, et du rapport  $\text{Na}^+/\text{CEC}$  (salinité du sol) tout au long des 4 séries de prélèvement grâce à des boxplots (boîtes à moustaches) sur R. Certains résultats ont été complétés par des tests ANOVA, analysant les différences entre 2 moyennes ou plus et ayant pour but de préciser si ces différences sont significatives ou pas. Les différences entre deux classes sont jugées significatives lorsque les lettres par lesquelles elles sont représentées sont différentes.

## RESULTATS

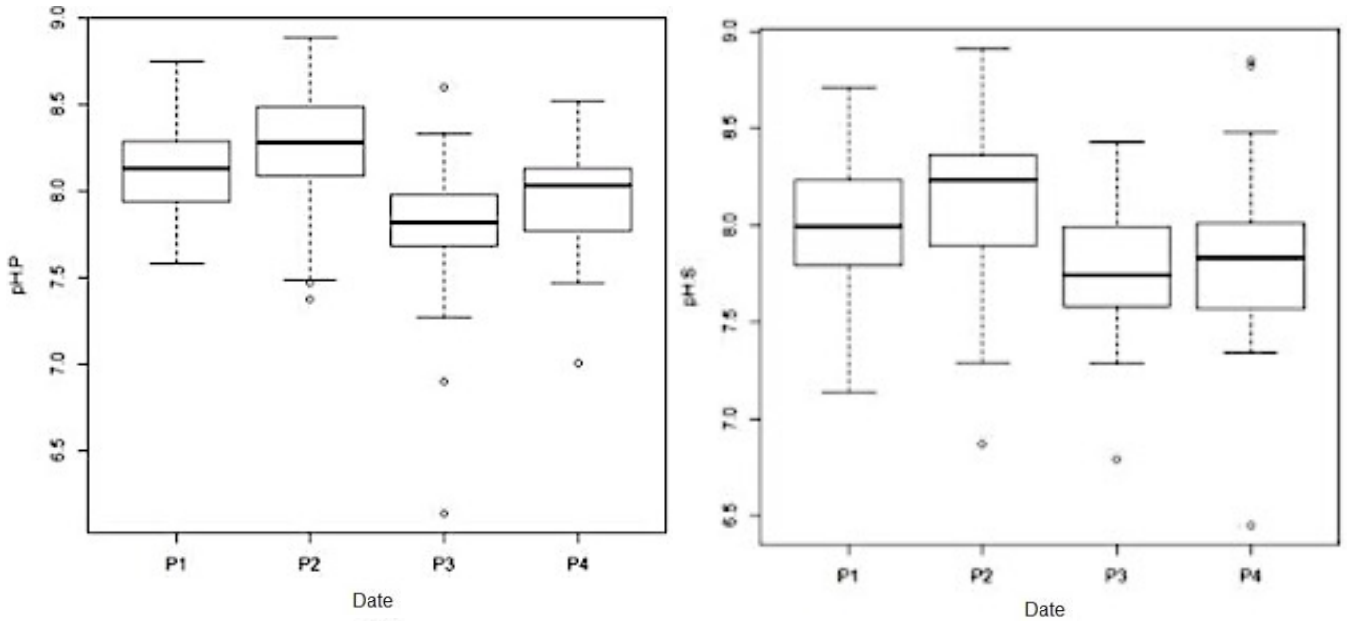


Figure 14 : Boxplot représentant l'évolution des pH des prélèvements des 4 séries : à gauche en profondeur, à droite en surface

Tableau 4 : Résultats du test ANOVA pour la figure 14

Profondeur				Surface			
P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
bc	c	a	ab	ab	b	a	a

D'après la figure 14 et le tableau 4, le pH du sol n'augmente pas de façon significative après épandage de sel. En revanche, on constate que de manière générale, le pH des sols révélés l'année précédente est significativement plus alcalin que celui de cette année. Cela s'explique par le fait que les deux hivers ont été peu rigoureux donc il y a eu peu d'épandage de sel et également par le fait que l'hiver 2015/2016 a été encore plus doux que le précédent.

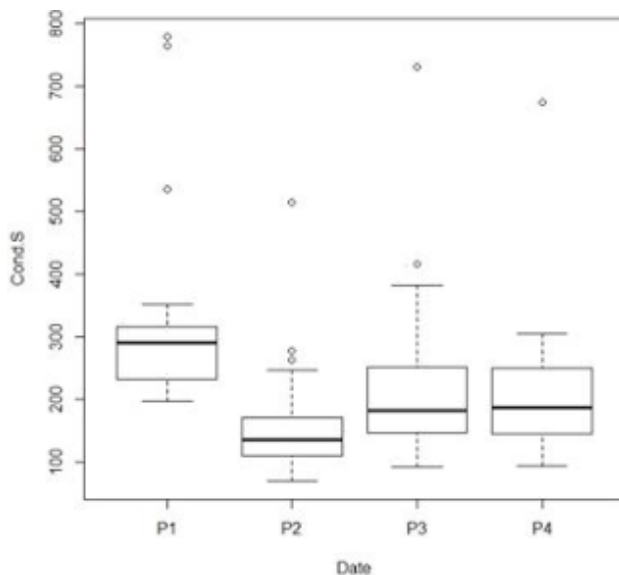


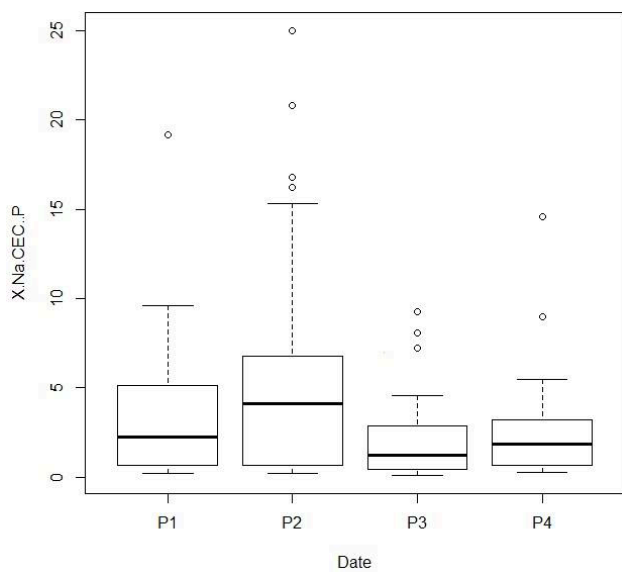
Tableau 5 : Résultats du test ANOVA pour la figure 15

P1	P2	P3	P4
c	a	b	ab

**Figure 15 : Boxplot représentant l'évolution de la conductivité des prélèvements de surface des 4 séries**

Sur la figure 15 on remarque que la conductivité avait diminué de moitié en sortie d'hiver 2015 (P2). Cela n'est pas le cas en sortie d'hiver 2016 (P4). De plus, les différences observées sont significativement différentes en 2015 contrairement à 2016 (tableau 4). En effet, la conductivité reste stable autour de 200 mS/cm. Cela s'explique également par la quasi absence d'épandage de sel durant l'hiver 2015/2016, qui ne permet donc pas de trouver une corrélation entre variation de conductivité et concentration en sel sur cette année.

Pour le boxplot de profondeur, la tendance est la même, même si la variation avant/après hiver 2014/2015 est moins marquée. Les valeurs de conductivité restent tout de même en moyenne autour de 200 mS/cm.



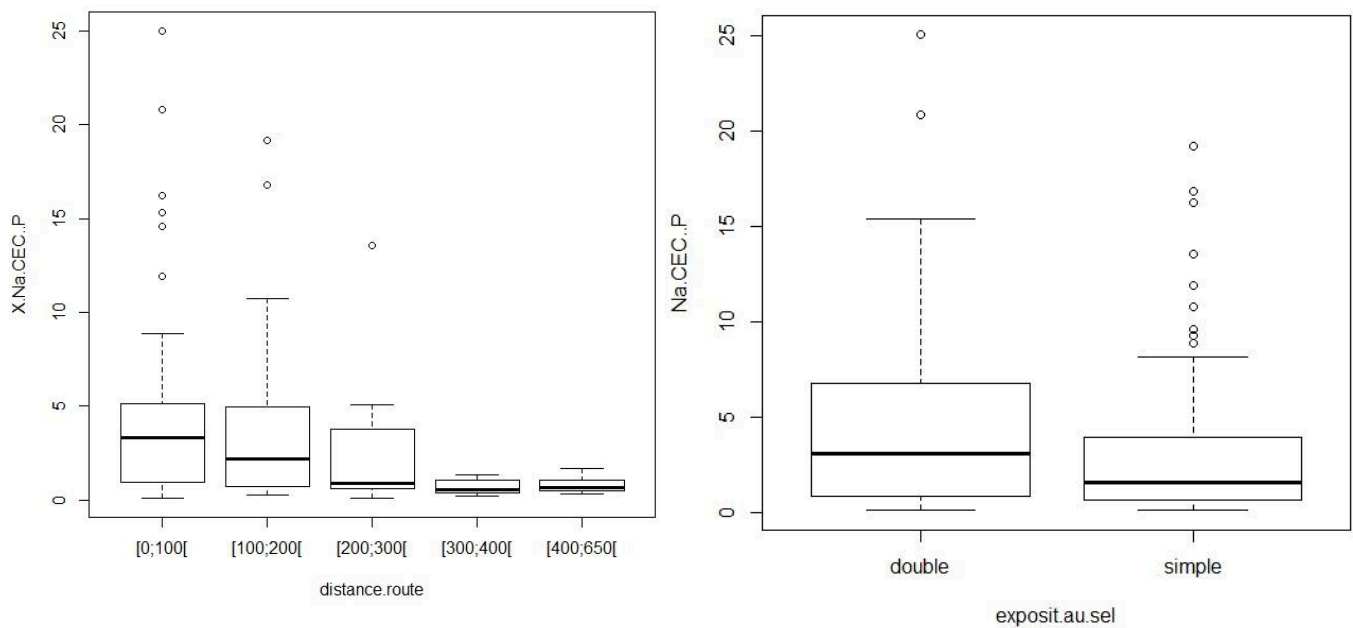
**Tableau 6 : Résultats du test ANOVA pour la figure 16**

P1	P2	P3	P4
a	b	a	a

**Figure 16 : Boxplot représentant l'évolution du rapport Na<sup>+</sup>/CEC des prélèvements de profondeur des 4 séries**

Sur la figure 16, le taux de saturation en Na<sup>+</sup> de la CEC, a augmenté entre les deux prélèvements (avant et après hiver) pour le 1<sup>er</sup> projet. Au contraire, on remarque que cette année il n'y a pas eu de variation du taux de saturation de la CEC. Ceci peut à nouveau s'expliquer par de plus faibles apports en sel cette année.

Le graphique présentant les résultats de surface appui ce raisonnement en montrant des résultats similaires, même si la saturation est plus importante en valeur en profondeur. Comme on peut le voir dans le tableau 5, les conclusions qui ont été tirées sont appuyées par un test ANOVA où les différences sont significatives entre les prélèvements 1 et 2 et non significatives entre les 3 et 4.



**Figure 17 : Boxplot représentant l'évolution du rapport  $\text{Na}^+/\text{CEC}$  des prélèvements de profondeur des 4 séries en fonction de la distance à la route (m) (gauche) et en fonction du type d'exposition (à droite)**

**Tableau 7 : Résultats des tests ANOVA pour les valeurs en profondeur et surface (résultats identiques)**

[0;100[	[100;200[	[200;300[	[300;400[	[400;650[
b	ab	ab	a	ab

On remarque que plus l'arbre est éloigné de la route, moins la saturation en sel de la CEC est importante. Le test de comparaison de moyennes montre que les différences sont significatives entre les catégories de distance de moins d'1m et celle entre 3 et 4m. Il y a donc bien un impact de la distance à la route sur la saturation en sel de la CEC et donc la saturation en sel du sol.

L'exposition de la fosse de plantation à la route a également un impact sur le rapport  $\text{Na}^+/\text{CEC}$ , ce qui est logique : une double exposition, c'est-à-dire que l'arbre est entre deux routes reçoit plus de sel que s'il n'était exposé que sur un côté. L'interprétation est la même pour les échantillons de surface.

Ainsi, nos différentes analyses statistiques nous ont permis d'arriver à la conclusion suivante : Une fosse de plantation éloignée de la route, d'au moins 3 à 4 mètres qui ne présente qu'une seule exposition au sel aura dans son sol un rapport  $\text{na}^+/\text{CEC}$  plus faible, c'est à dire que la proportion de sel dans le sol sera moins importante.

Une de nos hypothèses était que le type de recouvrement de la fosse ainsi que la hauteur des trottoirs avait un impact sur la teneur en sel du sol. Nos résultats nous ont prouvé le contraire, mais il est fort possible que la quasi absence d'épandage de sel cet hiver soit la cause d'une absence de corrélation.

## CONCLUSION

Du fait d'un climat froid où neige et gel sont fréquents en hiver et d'une population importante dont 70 % est active, il est nécessaire d'établir des mesures permettant le maintien de l'activité économique de la ville et la sécurité des usagers. Il est donc indispensable de maintenir de bonnes conditions de circulation dans une agglomération aussi importante que Nancy.

Le moyen principal mis en œuvre pour conserver cette viabilité est l'épandage de sel (chlorure de sodium). Ce produit est majoritairement utilisé car il est peu coûteux et assez efficace. Dans le but de déterminer quel type de fosses de plantation était le plus à même de protéger les arbres en ville du sel, nous avons effectué une recherche bibliographique qui nous a permis de comprendre les mécanismes d'attaque du sel sur les plantes. En effet, le sel a un impact négatif sur les propriétés physico-chimiques du sol mais également sur les échanges entre la plante et le sol.

Un protocole d'analyse de terre a été mis en place pour mesurer différents paramètres physico-chimiques représentatifs de l'état du sol vis à vis du sel : des mesures de conductivité, de pH, et de concentration des ions du sol  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  par ICP-AES sur les échantillons de terre prélevés sur 40 points stratégiques dans tout le Grand Nancy nous ont permis d'établir des liens entre teneur en sel du sol et type de fosse grâce aux analyses statistiques.

En effet, l'analyse ACP nous a permis de déterminer des corrélations entre distance à la route et saturation en sel dans le sol, et entre exposition au sel et saturation. De plus, le sel acidifie de manière nette le pH du sol, comme le montrent les boxplots. Nous pouvons ainsi dire qu'une fosse de plantation idéale pour les arbres en ville est une fosse qui ne présente qu'une seule exposition au sel et qui est située à au moins 3-4 mètres de la route

N'ayant pas trouvé de corrélation entre saturation en sel dans le sol et type de recouvrement de la fosse, (couvert végétal, béton), il serait intéressant de voir si des espèces décoratives au pied des arbres pouvaient, selon leurs caractéristiques, protéger les arbres d'une concentration nocive en sel. Il serait nécessaire de confirmer ces expériences lors d'une année froide où il y aurait suffisamment de neige pour avoir un épandage de sel significatif.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] : CHAMPAGNE O., *Climator : le site du climat et de la météo en Lorraine*  
<http://www.climator.fr/climatologie/nancyessey> (mis à jour 24/03/2014)
- [2] : SECHET G., météorologiste, créateur du site et présentateur météo sur BFMTV.  
<http://www.meteo-metz.com> (mis à jour 12/2015)
- [3] INSEE (Institut national de la statistique et des études économiques), *Recensement de la population et exploitations complémentaires*
- [4] ici-c-nancy.fr, publié dans Grand Nancy, *Viabilité Hivernale du Grand Nancy 2015 : les équipes prêtes à affronter la neige et le verglas*, 27/11/2015  
<http://ici-c-nancy/grandnancy/item/10301-viabilite-hivernale-du-grand-nancy-2015/les-equipes-pretas-a-affronter-la-neige-et-le-verglas.html> (mis à jour 12/2015)
- [5] Ministère de l'écologie, du développement durable et la Direction interdépartementale des routes Est, *Dossier de presse viabilité hivernale 2014-2015*, 09/2014 <http://www.meurthe-et-moselle.gouv.fr/content/download/8014/49625/file/dossier-de-presse-vh14-15.pdf>
- [6] University of Tennessee, Knoxville *SP610 Tree Susceptibility to Salt Damage*, Service adapted from Dirr 1976, JOHNSON & SUCOFF 1999, LUMIS et al. 1975, 07/2003, 5p.
- [7] CHEVERRY C. professeur de Science du Sol à l'ENSA de Rennes, ROBERT M. Directeur de recherche à l'INRA, *La dégradation des sols irrigués et de la ressource en eau : une menace pour l'avenir de l'agriculture et pour l'environnement des pays du sud de la méditerranée ? Etude et gestion des sols*, 1989
- [8] JABNOUNE, M. Thèse de doctorat, Montpellier Supagro, Centre International d'Etudes Supérieures en Sciences Agronomiques, *Adaptation des plantes au stress salin : caractérisation de transporteurs de sodium et de potassium de la famille HKT chez le riz*, 289p, 2008
- [9] LINCOLN T., ZEIGER E., University of California, *Plant Physiology et Development* 6<sup>th</sup> edition, 761p., 2015

[10] MOURAVIEFF I., *Action de la lumière sur la cellule végétale*, *Bulletin de la Société Botanique de France*, 105 :9, 467-475, 1958

[11] VASSEUR P. *Bois au pot élagage*,  
<http://boisaupot-elagage.fr> (mis à jour 30/01/2008)

[12] Conseil d'Architecture d'Urbanisme et de l'Environnement de Seine-et-Marne, HADDAD Y. *Impact du sel de déneigement sur les arbres*,  
<http://www.arbres-caue77.org> (mis à jour 12/2015)

[13] GOURRIEC S., Mémoire de fin d'étude Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage, AgroCampus Ouest, *L'arbre en ville : le paysagiste concepteur face aux contraintes du projet urbain*, 2012.  
<http://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00739439/document>

[14] Ministère de l'écologie et du développement durable, *Viabilité hivernale, raclage*, 7/01/2013  
<http://www.viabilite-hivernale.developpement-durable.gouv.fr/le-raclage-a4538.html>

[15] CETE de l'Est, *Déneigement techniques de raclage et matériels*, 03/1991  
<http://dtrf.setra.fr/pdf/pj/Dtrf/0000/Dtrf-0000647/DT647.pdf?openerPage=notice>

[16] CHARBONNEAU P. *Sels de voirie : une utilisation nécessaire*  
[http://www.provancher.qc.ca/upload/file/130\\_1%20p%2075-81.pdf](http://www.provancher.qc.ca/upload/file/130_1%20p%2075-81.pdf)

[17] LIVET J. , *Fondants utilisés pour traiter la chaussée*, 01/1998  
[http://www.viabilite-hivernale.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Fondants\\_utilises\\_pour\\_traiter\\_les\\_chaussees-2.pdf](http://www.viabilite-hivernale.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Fondants_utilises_pour_traiter_les_chaussees-2.pdf)

[18] ICAX (Interseasonal Collection And eXchange) *Interseasonal heat transfer*  
[http://www.icax.co.uk/interseasonal\\_heat\\_transfer.html](http://www.icax.co.uk/interseasonal_heat_transfer.html)

[19] ROUSSEL J.-J., *Infrastructures*, 01/2016  
<http://www.infrastructures.com/0906/neige.htm>



# ANNEXE

## Annexe : analyse statistique ACP complète (surface et profondeur)

