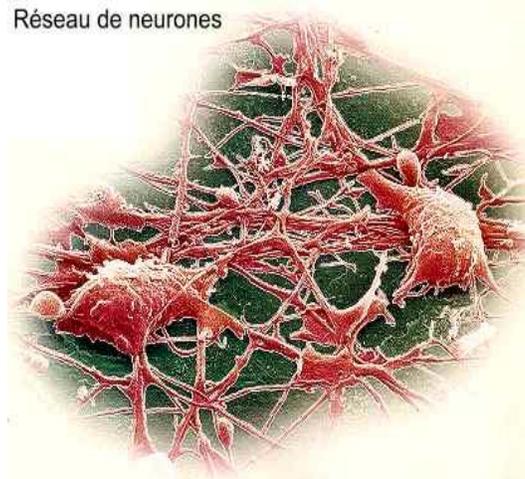


L'intelligence artificielle au service du déglacement des chaussées

Réseau de neurones



Yves Fournaise
Chef des CS et de l'Exploitation
Ministère des Transports du Québec
Direction de l'Estrie

Exposé préparé pour la séance sur les

**Systèmes de gestion à l'appui de la prise de décisions
pour l'entretien hivernal et estival des routes**

du congrès annuel de 2007 de
l'Association des transports du Canada
à Saskatoon (Saskatchewan)

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	3
INTRODUCTION	3
PARTICULARITÉS GÉOGRAPHIQUES DE L'ESTRIE	4
OBJECTIFS VISÉS	5
PLAN DE LA PRÉSENTATION	5
POURQUOI LE MTQ DEVAIT-IL S'INVESTIR DANS UN RÉSEAU DE NEURONES ?	6
QU'EST-CE QU'UN RÉSEAU DE NEURONES ?	10
LES INTRANTS	12
LES SORTIES	13
COMMENT UN RÉSEAU DE NEURONES GÉNÈRE-T-IL UN MODÈLE MATHÉMATIQUE ?	14
UN RÉSEAU ENTRAÎNÉ EST-IL EXPORTABLE ?	18
CONCLUSION	18
RÉFÉRENCES	19

RÉSUMÉ

Nous définirons au cours de cette présentation ce qu'est un réseau de neurones et comment on peut, à partir des informations qui y circulent, générer un modèle mathématique qui permette d'établir des taux d'épandage de fondants et d'abrasifs pour déglacer les routes en période hivernale.

Nous explorerons ensemble, de façon détaillée, quels sont les intrants qui influencent la couche intermédiaire de neurones de façon à produire le résultat souhaité, soit l'extrant.

Nous verrons également comment, à partir de l'expérience terrain acquise au fil des ans, il a été possible d'en arriver à une telle expertise en matière de viabilité hivernale.

Plusieurs scénarios ont été élaborés, validés et introduits avant d'en arriver à la performance du réseau de neurones tel que présenté aujourd'hui.

Nous démontrerons qu'un réseau de neurones produisant un modèle mathématique est le meilleur outil possible actuellement pour permettre le choix d'une intervention de déglacage.

INTRODUCTION

Lorsqu'au hasard d'une rencontre dans un colloque, M. Michel Gendreau, directeur du Centre de recherche sur les transports et Département d'informatique et de recherche opérationnelle de l'Université de Montréal, propose à M. Louis Ferland, ingénieur au ministère des Transports du Québec, d'élaborer un réseau de neurones qui générera un modèle mathématique suggérant des taux de pose et des proportions de mélange sel/abrasifs pour l'entretien du réseau routier en période hivernale, il soupçonne que ce projet est une première. Ses recherches ultérieures confirmeront ses soupçons.

Lors d'une rencontre des contremaîtres de l'Estrie, MM. Serge Hamel, contremaître en monitoring, et Sylvain Couture, contremaître en routes et structures, me proposent de siéger à une table de travail MTC-UM (ministère des Transports du Québec — Université de Montréal). À ce moment, je ne me doutais pas que ce projet me passionnerait au point d'être aujourd'hui devant vous en tant que conférencier.

Ma première coopération à ce contrat de recherche, du début de mars 2003 à la fin de septembre 2003, a été à titre de participant à une table de travail ayant pour mandat de fournir aux chercheurs de l'Université de Montréal un inventaire détaillé des éléments influents lors de la détermination de la recette de déglacage.

De septembre 2003 à septembre 2004, a eu lieu l'étude de scénarios alimentant le réseau de neurones pour en arriver à produire les sorties idéales, c'est-à-dire correspondre aux buts recherchés.

Puis, de septembre 2004 à ce jour, se sont déroulées les phases d'apprentissage et de tests du réseau de neurones.

Il est important de mentionner que la région de l'Estrie, par sa diversité et ses particularités géographiques, se prêtait particulièrement bien au développement de ce projet.

PARTICULARITÉS GÉOGRAPHIQUES DE L'ESTRIE

En effet, naître en Estrie était pour un réseau de neurones une situation avantageuse. Ceux qui connaissent la région savent que sa diversité géomorphologique appalachienne garantit une variété climatique caractérisée par plusieurs microclimats.

Un simple regard sur les altitudes explique cet état de faits. Le réseau autoroutier qui dessert Sherbrooke s'élève en direction de Magog et poursuit son ascension vers Stanstead, ville frontalière. Ce même réseau descend jusqu'à Richmond en suivant la vallée de la rivière Saint-François.

Les réseaux national et régional quant à eux desservent diverses municipalités moins peuplées telles que Lac-Mégantic, Valcourt, Asbestos, Weedon, St-Herménégilde et autres. Le tableau ci-dessous apporte d'ailleurs des indications révélatrices au sujet des altitudes.

Tableau I — Points d'altitudes en Estrie

Point de référence	Altitude (m)	Dénivelé (m)	Distance via route (km)
Sherbrooke	140		
Magog	210	70	34
Lac-Mégantic	410	270	96
Valcourt	210	70	43
Richmond	120	- 20	40
Asbestos	250	110	58
Weedon	260	120	52
Coaticook	290	150	34
St-Herménégilde	460	320	48
Stanstead	325	185	62

D'évidence, l'Estrie est un vaste territoire à relief montagneux dont la répartition de population est inégale et nécessite, de ce fait, un réseau routier présentant un large éventail de type de résultats à obtenir (antérieurement niveaux de service). Cet étalement était nécessaire pour que l'entraînement du réseau couvre la totalité des possibilités vu notre choix d'utiliser comme entraînement final les valeurs fournies par les chefs d'équipe du MTQ travaillant en régie.

Le tableau ci-dessous montre bien que la seule carence de validation "in situ" pour l'Estrie, se retrouve sur les routes à faible débit de circulation (anciennement niveau 3).

Tableau II — Débit de circulation

Débit de circulation	RÉGIE ET CONTRAT		RÉGIE SEULEMENT	
	km	%	km	%
1(a) + 20 000	81	4	81	14
1(b) 5 000 à 20 000	758	35	291	51
2 1 000 à 5 000	1137	52	200	35
3	190	9	0	0
TOTAUX	2 166		572	

De par ces faits, l'essentielle étape de validation couvrira un éventail de scénarios que l'on peut affirmer représentatifs des réalités d'entretien hivernal du réseau routier au Québec, entretien qui représente un véritable défi à l'aube du 2^e millénaire alors que les variations climatiques sont de plus en plus fréquentes et importantes.

OBJECTIFS VISÉS

La sécurité routière étant la première préoccupation du MTQ, il importe donc de trouver une méthode pour établir un taux de pose et un pourcentage de mélanges fondants/abrasifs qui rencontrent les objectifs fixés et qui répondent aux attentes des usagers du réseau routier.

Pour ce faire, il s'agit de procéder aux épandages des bons matériaux au moment le plus opportun pour obtenir un résultat optimal en tenant compte d'une multitude d'éléments tels le degré de température de l'air et de la chaussée, des vents, du trafic, des précipitations en cours et à venir, etc.

Comme les coûts de déneigement et de déglacage représentent d'importantes sommes du budget gouvernemental, il devient impératif de trouver un modèle mathématique d'application et d'intervention qui soit efficace et fiable.

PLAN DE LA PRÉSENTATION

-
- | | |
|---|--|
| 1 | Pourquoi le MTQ s'investit-il dans ce projet ? |
| 2 | Qu'est-ce qu'un réseau de neurones ? |
| 3 | Les intrants : paramètres significatifs qui seraient retenus pour influencer la réponse du modèle mathématique. |
| 4 | Les sorties : suggestion pour déglacer ou sécuriser le réseau routier. |
| 5 | Comment un réseau de neurones génère-t-il un modèle mathématique ? |
| 6 | Est-ce qu'un réseau entraîné est exportable ? |
-

POURQUOI LE MTQ DEVAIT-IL S'INVESTIR DANS UN RÉSEAU DE NEURONES ?

Nonobstant ce qui est mentionné plus haut, le but est de colliger un ensemble de scénarios de déglacement découlant de l'expérience qui forme notre professionnalisme et, ce faisant, d'assurer la pérennité de notre expertise en viabilité hivernale.

En effet, la majeure partie du personnel habilité aux opérations d'entretien d'hiver fait partie d'un groupe de travailleurs approchant de la retraite et l'embauche de la génération montante transmute difficilement de la théorie à la pratique.

Un survol des guides d'application élaborés par le MTQ depuis 20 ans démontre sans conteste que cette expertise est essentiellement une expertise terrain transmise par la pratique.

De 1985 à 1995, le principal outil de référence a été la fameuse « carte bleue » (voir reproduction à la page suivante).

Un survol rapide de ce document montre que l'analyse est basée sur plus ou moins trois intrants soit :

- la température de l'air;
- le niveau de service;
- 2 types de précipitations (neige et verglas).

La sortie n'offre que :

- 4 propositions de taux différents ;
- aucun mélange, si ce n'est l'ajout de calcium.

Tableau III — Choix des matériaux et taux d'application

CHOIX DES MATÉRIAUX ET TAUX D'APPLICATION					
Niveau de service	Température			Pluie verglaçante	Matériaux
	0 °C à -10 °C	-10 °C à -20 °C	-20 °C et moins		
I et II	100 à 225 kg/km				sel
		175 à 300 kg/km			sel + 5 à 10 % de calcium
		400 à 600 kg/km		300 kg/km	abrasifs traités
III	300 kg/km	400 à 600 kg/km		300kg/km	abrasifs traités
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Les taux d'application dépendent des températures anticipées. ▪ On ajoute du chlorure de calcium au mélange de base en fonction de la température au moment de l'application, tel qu'indiqué ci-dessous. 					
UTILISATION DES ABRASIFS SELON LA TEMPÉRATURE					
0 °C à -10 °C			Mélange de base (Mb)		
-10 °C à -20 °C			1 sac de calcium par m3 de Mb		
-20 °C et moins			2 sacs de calcium par m3 de Mb		

Tableau IV — Guide pratique d'entretien d'hiver

Guide pratique d'entretien d'hiver	
Niveaux de service	
I.	Chaussée déglacée sur toute la largeur, y compris les voies lentes.
II.	Chaussée partiellement déglacée, c'est-à-dire sur un minimum de 3 m au centre dans un tracé régulier et de 5 m au centre aux endroits dangereux, voies lentes entièrement déglacées.
III.	Chaussée présentant généralement une surface de neige durcie.
Application des matériaux de déglaçage	
Niveau I	: généralement entre 6 h 00 et 20 h 00 → sel;
Niveau II	: généralement entre 6 h 00 et 16 h 00 → sel;
Niveau III	: entretenu presque exclusivement avec des abrasifs traités.
<ul style="list-style-type: none"> • On n'applique pas de fondants sur les accotements. • L'épandage des matériaux suit généralement l'opération de déneigement. • Il faut laisser aux matériaux de déglaçage le temps d'agir avant de passer à nouveau le chasse-neige. • En cas de poudrerie, on applique le moins possible de matériaux ; s'il le faut, on utilise des abrasifs. • Pour une route à 2 voies, le sel est appliqué sur une bande centrale de 0,5 m à 1,5 m. Les abrasifs sont appliqués sur presque toute la largeur. La vitesse de rotation du plateau de dispersion doit être bien réglée. • La vitesse normale pour un épandage uniforme est de 40 km/h. 	
Note : Le déglaçage mécanique s'impose lorsque la couche de neige durcie ou de glace est trop épaisse.	

Gouvernement du Québec	Tous droits réservés
Ministère des Transports (87-01-01)	

De 1985 à 1995, c'est l'effervescence. On passe de l'entretien d'hiver à la viabilité hivernale. Un comité provincial de viabilité hivernale naît, on entend parler de prétrempage, couteaux au carbure, stations météorologiques, bilans tempêtes. Curieusement, malgré tout ce remue-ménage, le guide de taux d'application stagne. À preuve, en Estrie on a mis au point un guide d'application fortement inspiré de la carte bleue.

GUIDE D'APPLICATION

Tableau V — Guide d'application du sel et des abrasifs

Temp. °C	Heure de la journée	OPÉRATION DE DÉNEIGEMENT						OPÉRATION DE DÉGLAÇAGE		
		Pluie verglaçante ou grésil (aucun prétrempage)		Durant une neige légère		Durant une neige abondante		Ensoleillé	Nuageux	Vent
0 à - 7	5 h 00 à 8 h 00	310 kg/km	1/3 — 2/3 (sel) (abrasif)	160 kg/km		200 kg/km		160 kg/km	160 kg/km	160 kg/km
	8 h 00 à 15 h 00	240 kg/km	1/3 — 2/3 (sel) (abrasif)	120 kg/km		160 kg/km		120 kg/km	160 kg/km	160 kg/km
	15 h 00 à 21 h 00	310 kg/km	1/3 — 2/3 (sel) (abrasif)	160 kg/km		200 kg/km		160 kg/km	160 kg/km	160 kg/km
	21 h 00 à 5 h 00	240 kg/km	1/3 — 2/3 (sel) (abrasif)	200 kg/km	1/3 — 2/3 (sel) (abrasif)	240 kg/km	1/3 — 2/3 (sel) (abrasif)	200 kg/km		
- 7 à - 12	5 h 00 à 8 h 00	350 kg/km	1/3 — 2/3 (sel) (abrasif)	200 kg/km		240 kg/km	1/3 — 2/3 (sel) (abrasif)	240 kg/km	240 kg/km	240 kg/km
	8 h 00 à 15 h 00	270 kg/km	1/3 — 2/3 (sel) (abrasif)	240 kg/km	1/3 — 2/3 (sel) (abrasif)	240 kg/km	1/3 — 2/3 (sel) (abrasif)	200 kg/km	240 kg/km	240 kg/km
	15 h 00 à 21 h 00	310 kg/km	1/3 — 2/3 (sel) (abrasif)	240 kg/km	1/3 — 2/3 (sel) (abrasif)	300 kg/km	1/3 — 2/3 (sel) (abrasif)	270 kg/km		aucune application au vent
						Endroits dangereux seul.				
	21 h 00 à 5 h 00	310 kg/km	1/3 — 2/3 (sel) (abrasif)	200 kg/km	1/3 — 2/3 (sel) (abrasif)	210 kg/km	1/3 — 2/3 (sel) (abrasif)	350 kg/km	1/3 — 2/3 (sel) (abrasif)	
Endroits dangereux seul.						Endroits dangereux seul.				
- 12 et moins	6 h 00 à 14 h 00	Situation peu probable		350 kg/km	1/3 — 2/3 (sel) (abrasif)	350 kg/km	1/3 — 2/3 (sel) (abrasif)	300 kg/km	350 kg/km	abrasif seulement
	Endroits dangereux seul.									
	14 h 00 à 6 h 00	500 kg/km — abrasifs seulement								

Note : **Zone sensible** → Ajouter 40 kg de plus lors du déglacage
Voie lente → Augmenter 1.5 le taux d'épandage

Utiliser le prétrempage
Le mélange moitié-moitié est banni

Au niveau des intrants, ne se sont ajoutés que :

- l'heure;
- la couverture nuageuse;
- une distinction entre déneigement et déglçage (sécuriser / déglacer).

Comme sortie, on voit apparaître la notion de mélanges pendant que l'usage du chlorure de calcium semble disparu.

Qu'est-ce qui explique le peu de documentation et d'évolution d'un guide qui baliserait l'opération qui représente 60 % des dépenses du MTQ ? Voici quelques pistes de réponses :

- la multitude des paramètres tenus en compte lors de la prise de cette décision (21 entrées retenues au modèle actuel);
- l'importance relative que chacun donne à ces paramètres;
- l'inexistence de compilations et de références pour la majorité de ces paramètres;
- et surtout, la croyance profonde que c'était une connaissance du terrain difficilement assimilable théoriquement.

De 1995 à 2005, plusieurs rencontres ont lieu afin de permettre aux contremaîtres et opérateurs de faire des bilans tempêtes. Ces bilans étaient dressés à partir des réalités sur le terrain tant en terme météorologiques qu'en terme d'épandages réels (taux et mélange) et de résultats obtenus, c'est-à-dire les délais d'atteinte des niveaux de service requis, pour être ensuite comparés avec les guides d'application, les exigences de déneigement et de déglçage, etc.

Ces bilans ont permis, dans un premier temps, de se rendre compte que la théorie n'était pas toujours appliquée compte tenu du grand nombre de variables à considérer. Les méthodes anciennes prévalaient et, bien entendu, ne correspondaient pas nécessairement aux myriades de situations diverses engendrées par les changements climatiques plus fréquents et plus imprévisibles qu'auparavant.

Les années 2000 portent à l'avant-plan les normes environnementales et les pressions de groupes d'individus sensibles au sort de la planète et des écosystèmes affectés par les sels de voirie. Le ministère des Transports étant préoccupé par les effets de ses opérations sur l'environnement est donc prêt à mettre en œuvre les moyens pour atténuer les impacts environnementaux de ses interventions.

Le besoin de colliger et propager l'information relative aux quantités de sel épandu devenait impératif à plusieurs niveaux :

- efficacité des opérations;
- pérennité du savoir;
- souci environnemental;
- pressions économiques.

La venue du réseau de neurones permet d'espérer répondre à la nécessité de s'adapter à la réalité actuelle face aux normes de protection environnementale en rationalisant l'épandage des fondants tout en sachant en tirer le maximum, de façon à atteindre le niveau de sécurité redevable aux usagers du réseau routier.

Être ainsi avant-gardiste se fait toujours au risque de commettre quelques impairs qui permettent toutefois de s'enrichir puisqu'ils sont partie intégrante de l'expérience qui s'acquiert et se transmet.

Propulsé par le désir de vous faire bénéficier de cette expérience, je vais maintenant vous transporter dans un domaine plus technique et informatique en vous expliquant le plus clairement possible ce qu'est un réseau de neurones et comment il fonctionne en illustrant le tout d'exemples concrets afin de vous en faciliter la compréhension.

QU'EST-CE QU'UN RÉSEAU DE NEURONES ?

Les réseaux de neurones informatiques sont une partie de l'intelligence artificielle.

Le réseau se compare un peu à une boîte noire : on met d'un côté les informations et de l'autre on obtient une décision. Chaque neurone collecte les informations venant des neurones précédents et en déduit une information à transmettre aux neurones suivants.

La puissance d'un réseau de neurones vient de ce qu'il existe un algorithme, dit de rétropropagation, qui permet d'ajuster automatiquement les poids (variables) sur les connexions du réseau de façon à obtenir les réponses appropriées à partir des intrants fournis.

La terminologie utilisée provient de la similitude avec la structure du cerveau humain qui est composé d'un très grand nombre de neurones où chacun est en contact avec des milliers d'autres neurones via les connexions synaptiques.

Ou encore, tel que défini par M. François Ferland :

- "Un réseau de neurones informatique est un mécanisme qui permet d'émuler le fonctionnement de base d'un réseau de neurones biologiques dans le but de modéliser un système particulier. On note généralement 2 composantes dans un réseau de neurones : les neurones et les liens (ou axones pour emprunter le terme biologique) qui les unissent. Habituellement, chaque neurone possède une entrée et une sortie qui peuvent être connectées à plusieurs autres, voire à tous les neurones du réseau. Il existe donc plusieurs types de configuration pour un réseau de neurones."

VOIR LES ILLUSTRATIONS PRÉSENTÉES À LA PAGE SUIVANTE

Tableau VI — Modèle biologique

Cette section décrit un modèle très grossier des neurones biologiques qui a servi à la mise en place des premiers neurones formels.

Dans le cerveau, les neurones sont reliés entre eux par l'intermédiaires d'axones et de dendrites. En première approche, on peut considérer que ces sortes de filaments sont conducteurs d'électricité et peuvent ainsi véhiculer des messages depuis un neurone vers un autre. Les dendrites représentent les entrées du neurone et son axone sa sortie.

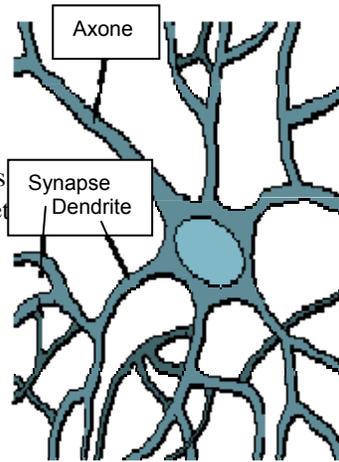
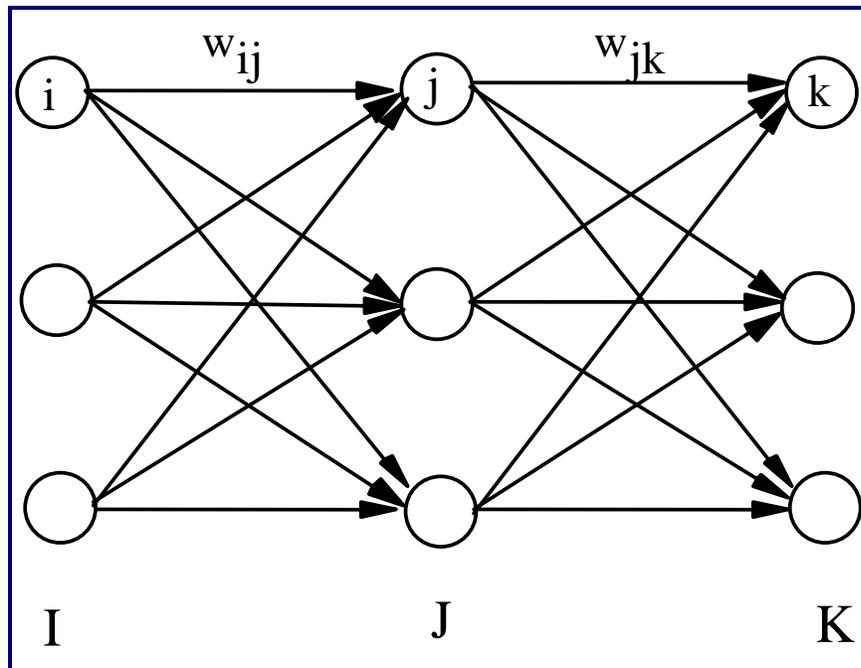


Tableau VII — Modèle informatique



LES INTRANTS

La chasse aux ENTRÉES

Cette étape sert à répertorier quelles sont les variables dont tient compte un décideur lorsqu'il commande une opération de déglacage sur le réseau routier.

La patience des chercheurs de l'Université de Montréal a été mise à rude épreuve au cours de cette recherche. Les contremaîtres présents énuméraient une multitude de variables, chacun défendant l'importance du paramètre nommé.

À titre d'exemple, imaginez une discussion "constructive" à chacune des variables suivantes :

- but visé (déglacer, sécuriser, maintenir le réseau en état);
- condition de la chaussée nécessitant une intervention (neige, slush, neige durcie, glace, glace noire, verglas);
- température de l'air;
- température de la chaussée (lorsque disponible);
- importance du trafic (DJMA ou DJMH ou mieux DJMH horaire);
- proportion de trafic lourd (augmente les exigences, chasse les matériaux, stresse les automobilistes);
- date (longueur d'ensoleillement, force du soleil — mois de l'année —, jour de la semaine via heures de pointe);
- heure (effet heure de pointe à considérer ?);
- niveau de service demandé (dégagement complet, dégagement vis-à-vis pneus, fond de neige durcie);
- circulation à contresens (ou voies séparées);
- état du pavage (couleur, déformation);
- résidus de fondants sur la route (effet 1^{re} neige, effet lavage après verglas);
- section MÉTÉO
 - couverture nuageuse (dégagé, partiellement couvert, couvert);
 - vent;
 - vent dans les 6 prochaines heures;
 - type de précipitations observées (aucune, pluie, neige mouillée, neige, verglas);
 - type de précipitations prévues dans 3 heures;
 - accumulations prévues pendant les 3 prochaines heures;
 - température de l'air prévue dans 6 heures;
 - température de l'air prévue dans 12 heures (pour établir une tendance au réchauffement ou au refroidissement).

On peut donc facilement imaginer que ce travail de “brainstorming” a été difficile pour nos néophytes universitaires qui, connaissant l'étape suivante, savaient qu'ils auraient à ajuster les poids sur les connexions du réseau de façon à obtenir les réponses appropriées.

Aussi, comme cela se produit souvent en recherche scientifique, c'est en s'interrogeant sur les réponses possibles (sorties) que nous sommes finalement parvenus à cerner la question.

Cela m'amène donc à vous présenter l'étape suivante.

LES SORTIES

L'entrée des SORTIES

1^{re} sortie — fournir un taux de pose (incrémenté à la dizaine)

Les possibilités de taux d'épandage pour le sel sont de 100 à 350, pour le sable de 200 à 500 et pour les mélanges de 160 à 400, soit 79 possibilités.

C'est en prenant conscience du nombre de possibilités des taux de pose que nous avons réalisé l'apport non significatif et/ou la neutralisation de paires de variables.

Nous sommes ainsi sortis du labyrinthe des intrants personnels en retenant les intrants significatifs et influents. Notre sélection a également été influencée par le potentiel d'automatisation d'entrée de la donnée.

2^e sortie — choisir le matériau SEL, SABLE, ou MÉLANGE (proportion sel/sable)

À ce stade, il était tentant de bâtir le réseau de neurones à partir d'une théorie, mais conséquemment à notre objectif initial d'assurer la pérennité de notre maîtrise en viabilité hivernale, nous avons fourni comme paramètres les recettes terrain de nos chefs d'équipe. Voilà pourquoi on parle de mélange!

3^e sortie — le prétrempage

Le prétrempage est-il recommandé ou non ?

4^e sortie — niveau de confiance que ce type de situation a permis de réussir

Ce % est un indice pour quantifier la reconnaissance des possibilités illimitées de scénarios en viabilité hivernale tout en indiquant les zones propices à l'initiative.

COMMENT UN RÉSEAU DE NEURONES GÉNÈRE-T-IL UN MODÈLE MATHÉMATIQUE ?

Le 25 septembre 2003, lorsque M. Jean-Yves Potvin, professeur titulaire, et M. Michel Gendreau, directeur du Centre de recherche de l'Université de Montréal, ont remis le réseau de neurones au MTQ, les poids attribués aux neurones se basaient sur 69 scénarios fournis par un groupe de travail, formé de 2 chefs d'équipe et 2 contremaîtres, qui avait étudié les scénarios et convenu des sorties idéales.

Je ne sais pas pourquoi, mais il me semble que tout projet, aussi prometteur soit-il, passe par une phase dite de « traversée du désert ». Je laisse à M. François Ferland le soin de décrire cette période gestative de septembre 2003 à septembre 2004 :

- " Modifier le réseau pour qu'il fonctionne sur une plateforme .NET sous la forme d'un service Web et d'une interface ASP.NET afin de pouvoir accéder au modèle à partir de n'importe où sur le réseau routier du Ministère. En collaboration avec les chercheurs (M. Gendreau et M. Potvin), il y a eu quelques tests pour tenter de trouver le nombre idéal de neurones sur l'étage intermédiaire. La majeure partie du travail s'est située dans la conversion de la plateforme d'une application à interface par la ligne de commande à une application Web distribuée sur 2 serveurs ".

Notre réseau de neurones existe mais il est sous alimenté. La prochaine étape devra répondre à la question **Comment un réseau de neurones génère-t-il un modèle mathématique ?** La réponse : **par l'entraînement du réseau à partir des cas originaux.**

L'entraînement se schématise en 3 phases :

Phase d'apprentissage

- on donne des exemples au réseau de neurones ;
- par un algorithme d'apprentissage, le réseau ajuste ses poids pour minimiser une erreur ;
- quand l'erreur cible est atteinte, le réseau est prêt.

Rétropropagation du gradient

- consiste à regarder la différence entre la valeur cible attendue par le réseau et la valeur donnée par celui-ci lors de la phase d'apprentissage ;
- le réseau modifie ses propres poids en fonction du gradient de cette différence.

Phase de tests

- consiste à regarder si le comportement du réseau est satisfaisant sur un ensemble d'exemples ;
- on quantifie alors la zone de confiance du réseau de neurones.

C'est le 21 septembre 2004 que je reprends du service actif avec l'arrivée de l'étape d'entraînement. J'étais loin de me douter que plusieurs spécialistes avaient une opinion arrêtée face au défi que j'acceptais tel qu'en font foi les commentaires ci-après.

Tableau VIII — Commentaires trouvés sur Internet

Commentaires trouvés sur Internet
« L' ENTRAÎNEMENT DES RÉSEAUX DE NEURONES EST <u>L'ASPECT LE PLUS DIFFICILE</u> DE LEUR UTILISATION. L'ENTRAÎNEMENT REVIENT À TROUVER LES POIDS PERMETTANT AUX RÉSEAUX DE FONCTIONNER AVEC UNE PERFORMANCE ACCEPTABLE .»
« CHAQUE NEURONE DONNE PLUS OU MOINS D'IMPORTANCE À CERTAINES DES INFORMATIONS QU'IL REÇOIT. L'APPRENTISSAGE CONSISTE À TROUVER LES AJUSTEMENTS POUR QU'IL ACCORDE LA BONNE IMPORTANCE À LA BONNE INFORMATION. POUR CELA, À CHAQUE PRÉVISION FAITE PAR LE RÉSEAU DE NEURONES AU MOMENT DE SON APPRENTISSAGE, ON LUI PRÉSENTE LA RÉPONSE QU'IL AURAIT DÛ SORTIR. IL ANALYSE LES ÉCARTS POUR S'ADAPTER. <u>CET APPRENTISSAGE SUPERVISÉ A POUR INCONVÉNIENT QUE L'ON NE SAURA PAS COMMENT FAIT LE RÉSEAU POUR TRAVAILLER.</u> PAR CONTRE, UNE FOIS L'APPRENTISSAGE FAIT, EN UTILISATION LE RÉSEAU NE FAIT QUE DES OPÉRATIONS MATHÉMATIQUES, CE QUI PERMET DE FAIRE UN TRAVAIL À UNE RAPIDITÉ PERMETTANT DES APPLICATIONS EN TEMPS RÉEL ».

Malgré la mise en garde du manque d'entraînement, les quelques essais effectués au hasard m'ayant convaincu du potentiel du réseau de neurones, j'accepte la direction du groupe de travail qui a pour mandat d'entraîner le réseau. Mon évaluation de l'ordre de grandeur du travail à effectuer s'appuie sur un extrait du document remis avec le réseau par MM. Michel Gendreau et Jean-Yves Potvin :

- « Il faut évidemment fournir plusieurs scénarios différents au réseau de neurones pour lui permettre de réaliser un apprentissage conséquent. »

Plusieurs c'est combien ?

La réponse de M. François Ferland :

- « On recommande 4000 scénarios d'apprentissage pour un modèle de 20 entrées, le réseau est actuellement nourri de 69. Je crois qu'on peut être performant avec moins de 4000 et je viserais 1000 dans un premier temps. La théorie spécifie que ce qui définit la relation entrée/sortie d'un réseau, c'est la façon dont un neurone combine ses entrées pour calculer sa sortie (on appelle ces combinaisons la courbe d'activation d'un neurone) et les liens entre les divers étages de neurones. »

Mais pourquoi autant ?

La réponse de M. François Ferland :

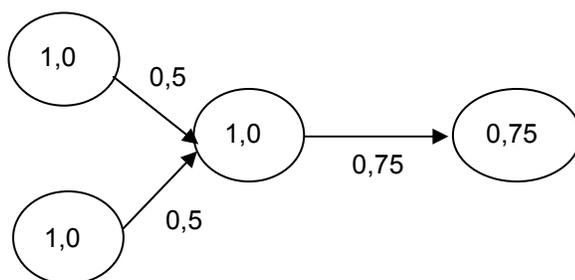
- « On attache un facteur ou poids à chacun des liens qui multipliera la sortie d'un neurone avant de la transmettre à l'entrée d'un autre neurone. Définir ces poids manuellement est très peu pratique et c'est pourquoi il existe diverses méthodes pour spécifier ces poids. On parle alors d'entraînement du réseau. Généralement, on génère un ensemble de scénarios permettant d'attacher une combinaison de valeurs d'entrées à une combinaison de valeurs de sorties que le réseau devrait prendre. On part habituellement d'un ensemble de poids définis au hasard et on tente d'approcher la sortie initiale du réseau à la sortie souhaitée. »

Dans notre cas, nous effectuons un apprentissage par rétropropagation où l'on ajuste les poids en parcourant les liens de la sortie à l'entrée proportionnellement à l'erreur de la sortie, c'est-à-dire l'écart entre la sortie obtenue et celle souhaitée. Après un certain nombre d'itérations de ce processus, on atteint un point où nos ajustements ne permettent pratiquement plus de coller à la sortie souhaitée. C'est alors qu'on peut dire que le réseau est entraîné.

Supposons que le modèle, après avoir testé tous les scénarios, donne un taux d'épandage 2 fois plus élevé que celui souhaité, il réduira alors les poids des neurones dans le réseau qui ont le plus influencé le taux d'épandage afin d'abaisser sa réponse. Il répétera ce processus jusqu'à ce qu'on ait atteint un taux d'erreur acceptable (disons moins de 10%) ou qu'on ait atteint un nombre maximal d'itérations (disons 1000).

À titre d'exemple, considérons un réseau de neurones qui aurait 2 entrées, un neurone intermédiaire et une sortie et qui serait initialisé de cette façon :

Figure 1 — Réseau de neurones



Remarque : Les nombres sont incorrects et le processus est un peu plus complexe, mais l'idée générale y est.

Dans ce scénario, les deux entrées sont 1,0. À l'état initial, le réseau va calculer une sortie de 0,75. On peut le calculer assez facilement. À l'étage intermédiaire, on effectue la somme des entrées multipliées par leurs poids; on a donc $(1,0 * 0,5) + (1,0 * 0,5) = 1,0$. Pour la sortie, on multiplie l'étage intermédiaire avec son poids : $(1,0 * 0,75) = 0,75$. Supposons que ce scénario doive obtenir une sortie de 0,5 plutôt que 0,75, le modèle commence par calculer le taux d'erreur initial. Présentement, notre sortie est 1,5 fois celle souhaitée. Notre sortie devrait donc être abaissée d'environ 33%. Le modèle réduira les poids qui ont emmené cet écart afin de s'approcher le plus possible de la réponse souhaitée. Disons que le modèle décide de réduire le taux de sortie par cette valeur, on obtiendra alors un poids entre l'étage intermédiaire de 0,5 qui nous donnera la sortie souhaitée de 0,5.

Un véritable réseau de neurones aurait également modifié les poids entre les entrées et l'étage intermédiaire. Généralement, on calcule un taux de correction proportionnel à l'erreur présente au neurone et à l'influence que ce neurone a sur la sortie. De plus, les neurones utilisés dans notre cas ont des fonctions d'activations particulières un peu plus complexe qu'une simple multiplication de façon à empêcher une sortie en dehors de la plage -1 à 1.

M. François Ferland a conséquemment développé des outils d'assistance à l'entraînement du réseau qui ont généré un ensemble de scénarios permettant d'attacher une combinaison de valeurs d'entrées à une combinaison de valeurs de sorties que le réseau devrait prendre.

Je réunis donc un nouveau groupe de travail (nous sommes 2 contremaîtres et 2 chefs d'équipe), pour valider 65 autres scénarios originaux.

Grâce à l'outil d'assistance, il a été facile de produire 900 scénarios que, pour une raison d'efficacité, j'ai dû valider seul.

À noter que 100 des scénarios définis « automatiquement » ont été carrément rejetés (détruits) car ils définissaient une situation impossible à rencontrer.

L'introduction des 925 scénarios validés a constitué la phase d'apprentissage.

Le groupe de travail est actuellement à l'oeuvre sur la phase d'analyse de rétropropagation du gradient car l'introduction de 900 scénarios n'a pas eu que l'effet escompté, à savoir confirmer le poids adéquat des neurones, il a aussi fait ressortir quelques aberrations (inversion des effets des paramètres : heure de pointe et état du pavage) qui nous obligent à procéder à une étude pour découvrir s'il s'agit d'un cas de surentraînement (les réponses fournies apprennent cette tendance inversée), ou s'il s'agit plutôt d'erreur de poids initial des neurones du réseau.

Parallèlement, le groupe de travail effectue la mise à l'essai du réseau de neurones par des situations réelles et le développement d'une méthodologie pour collecter des données de scénarios (in situ) validés et approuvés par les chefs d'équipe de l'Estrie, ce qui correspond à la phase de tests.

Il faut comprendre ici que l'entraînement est une phase de conception d'un réseau. L'entraînement ne peut se faire en continu vu les risques :

- que les écarts mathématiques (poids) s'amenuisent ;
- qu'il y ait surentraînement (risques d'apprendre des erreurs) ;
- qu'il y ait une catégorie de cas représentés en surnombre pouvant engendrer des difficultés de prévisions (projection) car il est prouvé qu'un réseau apprend, mais oublie aussi !

Nous avons donc développé des outils pour mettre en relation :

- la solution proposée par le modèle mathématique ;
- la recette utilisée préconisée par le chef d'équipe ;
- le relevé des actions posées par nos unités d'intervention : CIM (centre intégré en monitoring) et le projet STI Exploitation (système de transport intelligent).

Seule la validation, par une étude comparative de ces 3 sources, nous permet d'assurer la validité de scénarios qui peuvent être introduits en apprentissage pour parfaire et stabiliser les poids sur les neurones, en sachant que le modèle a appris et projette de façon acceptable.

UN RÉSEAU ENTRAÎNÉ EST-IL EXPORTABLE ?

Quel est l'avenir de ce réseau une fois « entraîné »? Est-il exportable ?

L'avenir escompté est d'automatiser la cueillette de données.

Avec un optimisme raisonnable, j'imagine qu'un chef d'équipe demande une consultation : il fournit l'identification du circuit visé, le but visé (déglacer ou sécuriser) et l'heure de la prévision voulue. Le modèle connaît déjà les 20 paramètres, plusieurs ayant été fournis en référence au numéro de circuit (débit journalier moyen hiver — horaire, longueur d'ensoleillement, niveau de service souhaité, classification fonctionnelle, état du pavage) et toute la section météo étant en alimentation continue via le technicien du CIM assisté par stations météorologiques.

Quant aux possibilités d'exportation, la réponse en est une de « **SI** » :

- Oui, **SI** nos scénarios d'apprentissage ont couvert l'éventail complet des combinaisons d'intrants possibles (si les scénarios propres à votre réalité ne sont pas sous représentés) ;
- Oui, **SI** l'usage du mélange sel / sable fait partie de votre réalité (qu'il n'y a pas de volonté locale, de difficultés d'approvisionnement, purisme de la théorie) ;
- Oui, **SI** vous avez une infrastructure d'accueil (exemple CIM) soit pour opérer manuellement ou automatiquement l'alimentation des paramètres d'entrées.

OUI le modèle mathématique est exportable sinon, en retroussant un peu nos manches, on peut lui apprendre à le devenir car le réseau de neurones qui sous-tend ce modèle a fait ses preuves.

CONCLUSION

Les premiers réseaux de neurones ont fait leurs preuves comme moyen de reconnaissance ; reconnaissance des visages ou lecture des codes postaux. Dans ces 2 cas, une multitude de paramètres sont perçus, synthétisés et finalement reconnus.

Le choix d'une intervention de déglacage sur le réseau routier québécois relève du même type de processus de décision ; une multitude de paramètres plus ou moins importants dépendamment de leur juxtaposition dans un contexte total. À mon humble avis, un réseau de neurones produisant un modèle mathématique est le meilleur outil possible actuellement pour exécuter cette tâche.

Je vous remercie de votre attention.

RÉFÉRENCES

Voici donc mes 3 principales sources :

- 2 textes remis par Michel Gendreau et Jean-Yves Potvin à la livraison du réseau de neurones (à la fin du contrat);
- les réponses (par courriel) de François Ferland à mes nombreuses questions;
- des extraits de présentations Power Point retrouvées sur Internet (malheureusement anonymes car repêchées par moteur de recherche).