

Avalanches sur les sites d'entreposage de neige usée au Québec

Étude exploratoire de l'exposition des travailleurs
au danger d'avalanche

Suivi 2018-2019



Prof. Daniel Germain

Table des matières

Contexte	2
Objectifs	2
Équipe de réalisation et financement	2
Les réalisations du suivi 2018-2019	3
Sur le terrain	3
Cartographie	3
Analyse de cas d'avalanches	3
Réunion avec les villes partenaires	3
Leçons à tirer du suivi 2018-2019	4
Sur la neige	4
Sur les pratiques de gestion des sites de dépôt de neige usée	6
Sur la méthodologie	9
Points-clés du suivi à l'hiver 2018-2019	10
Et pour la suite ?	11

Auteurs du rapport

- Responsable de la publication : Prof. Daniel Germain
La responsabilité du contenu de ce rapport n'engage que le prof. Daniel Germain, et non les partenaires du projet que sont les villes impliquées et l'APSAM.
- Conception et rédaction : Stéphanie Mercier

Remerciements

Merci à l'ensemble des villes impliquées dans ce projet pour leur intérêt, leur participation lors des réunions, et leur collaboration pour l'envoi d'informations utiles.

Des remerciements spéciaux à :

- Messieurs Alain Fournier et Jean-Pierre Laporte de la ville de Trois-Rivières, pour leur implication à la mise sur pied du projet, leur soutien et leur collaboration étroite pour équiper les sites en matériel vidéo permettant un suivi en continu.
- Monsieur Benjamin Pugi, de la ville de Montréal, pour son soutien, son implication, ses suggestions et apports techniques enrichissants, ainsi que les collaborateurs de la ville pour les accès aux sites et les discussions qui y ont eu lieu.
- L'APSAM, particulièrement Monsieur Serge Toutant, pour son implication dans la mise sur pied du projet et pour les démarches réalisées après l'hiver 2018-2019 pour sa continuité.
- Mon équipe de recherche, Jean-François Milot et Mathieu Gratton, pour leur assiduité lors des visites sur le terrain, le travail réalisé et les nombreuses discussions intéressantes.

Crédit photo de couverture : Ville de Laval

Contexte

Dans une région comme le Québec où la neige tombe en abondance tout au long de l'hiver, la gestion du déneigement représente un enjeu majeur pour les villes. Parmi les diverses étapes nécessaires, le dépôt de la neige usée sur des sites dédiés peut être une étape critique pour les travailleurs. En effet, la création d'amas de neige, hauts de plusieurs dizaines de mètres, présente un risque avéré d'avalanche, mettant en danger les travailleurs chargés de transporter et d'entasser la neige, du fait notamment de la gravité des lésions que peuvent induire les avalanches.

Bien que connu des gestionnaires de sites et des travailleurs, il est aujourd'hui difficile d'avoir des informations chiffrées sur la fréquence et l'ampleur de ces phénomènes, car les incidents ne sont que peu documentés. Toutefois, plusieurs avalanches se produisent chaque année sur des sites de neige usée au Québec, allant parfois même jusqu'à causer un accident mortel, comme ce fut le cas à Trois-Rivières en 2017. À travers la province, des centaines voire des milliers de travailleurs œuvrent sur ces sites, que ce soit pour transporter la neige ou l'entasser, représentant autant de situations à risque.

Le risque d'avalanche est-il sous-estimé sur les sites de dépôt de neige ? Des mesures pourraient-elles être mises en place pour renforcer la sécurité des travailleurs ? Certaines pratiques doivent-elles être évitées ? Comment intégrer les connaissances des avalanches en milieu naturel pour optimiser les pratiques de construction des amas dans les sites de dépôt ? Autant de questions qui ont poussé les villes à démarrer un processus commun d'échange de leçons apprises et de bonnes pratiques, et à faire appel à un spécialiste des avalanches en milieu naturel.

Sous l'impulsion de la Ville de Trois-Rivières, des réunions se sont tenues en 2017 et 2018 avec les villes de Montréal, Terrebonne, Laval, Longueuil, Québec, Lévis, Saguenay, Gatineau, Drummondville, Sherbrooke, Shawinigan, ainsi qu'un représentant de l'APSAM et un expert en avalanches. Toutes les villes partagent le besoin de trouver des solutions pour préserver les travailleurs.

Étant donné le manque de littérature scientifique et de documentation générale sur cette problématique, il est impossible de se baser sur des connaissances existantes. Il a donc été nécessaire de faire un travail préliminaire sur le terrain afin d'évaluer la situation ; travail débuté à l'hiver 2017-2018, puis renforcé à l'hiver 2018-2019. Le suivi réalisé durant l'hiver 2018-2019 fait l'objet du présent rapport.

Objectifs

Faisant suite aux premières visites de terrain et mesures prises à l'hiver 2017-2018, le suivi réalisé en 2018-2019 avait pour objectif d'approfondir la phase exploratoire de la problématique avec des visites de terrains intensifiées, des observations d'opérations de création des amas de neige et des tests de caractérisation de la neige. Ceci en vue de consolider l'approche et les méthodes possibles pour un travail plus approfondi qui permettra au final de proposer des recommandations de bonnes pratiques, adaptées aux réalités et aux possibilités des différents sites des villes partenaires.

Équipe de réalisation et financement

Réalisé par Daniel Germain, spécialiste en avalanches et professeur à l'Université du Québec à Montréal, ainsi que son équipe de recherche, ce suivi a pu s'effectuer grâce à la collaboration et au financement des villes de Trois-Rivières et Montréal, dans lesquelles s'est majoritairement fait le travail de terrain, d'observation et d'analyse. Cela n'exclut toutefois pas les autres villes, loin de là, mais cela a permis de concentrer les premiers travaux, en vue de consolider la méthode à appliquer ensuite à plus large échelle.

Les réalisations du suivi 2018-2019

Sur le terrain

- Visites régulières de 4 sites montréalais tout au long de la saison d'hiver, avec :
 - Tests réalisés sur les amas de neige :
 - Essais de profils de neige (ce qui est habituellement réalisé en milieu naturel pour connaître les caractéristiques de la neige, identifier les couches de neige susceptibles de favoriser une avalanche et établir des prévisions de danger d'avalanche).
 - Estimations de la densité de la neige sur les amas.
 - Mesures de hauteur et d'inclinaison des pentes sur les amas.
 - Discussions avec les gestionnaires des sites et des travailleurs, notamment des opérateurs de souffleuses.
 - Visite du site d'Angrignon après un appel annonçant qu'une avalanche était survenue.
- Grâce à l'installation de caméras de surveillance à haute-résolution par la Ville de Trois-Rivières sur ses sites, observation des opérations de dépôt de la neige (création des amas, circulation des machines sur les sites, etc.).

Nous étions également à disposition des autres villes en cas d'avalanche importante en cours de saison, mais la situation ne s'est pas présentée cet hiver.

Cartographie

- Cartographie de certains sites pour mieux les caractériser : superficie, orientation, configuration. La cartographie a été réalisée à l'aide des outils numériques Google Maps et Google Earth.

Analyse de cas d'avalanches

- Analyse des conditions météorologiques liées à trois avalanches majeures survenues récemment : Trois-Rivières (2017), Laval (2018) et Montréal (2019).
- Une approche statistique a été appliquée aux données météorologiques locales et régionales permettant de caractériser les conditions à proximité des sites au moment du déclenchement des avalanches, mais aussi de mieux connaître le gradient de précipitation (pluie et neige) et les périodes de redoux à travers la province. La météo étant un des facteurs clés du déclenchement des avalanches, il est nécessaire de mieux comprendre les conditions qui s'appliquent aux amas de neige usée, dont la compaction est différente de la neige en milieu naturel et qui réagit donc potentiellement différemment aux variations météorologiques.

Réunion avec les villes partenaires

- Une réunion de restitution des résultats du suivi à l'hiver 2018-2019 et de discussions pour la suite des recherches était prévue en juin 2019, mais compte tenu des inondations exceptionnelles du printemps 2019 et de la nécessité pour les villes de s'y consacrer pleinement, cette rencontre a été annulée.

Leçons à tirer du suivi 2018-2019

Sur la neige

- **Les caractéristiques de la neige usée et soufflée sur les amas sont différentes de celles que l'on retrouve dans les milieux naturels.** La compaction de la neige sur les amas est telle qu'il n'a pas été possible avec les moyens usuels (pelles et sondes) de creuser la neige pour en établir un profil. D'autres essais de mesure de la dureté de la neige à l'aide d'un pénétromètre se sont aussi révélés infructueux, il faudrait alors pour cela faire usage d'une foreuse (permettant des trous suffisamment larges pour observer la neige à quelques dizaines de centimètres de profondeur au moins), ce qui poserait toutefois des questions logistiques et sécuritaires pour amener le matériel sur les amas.
- **De par la compaction extrêmement élevée de la neige, la stabilité des pentes défie la morphologie naturelle des versants.** Sur les amas, les pentes observées ont parfois des inclinaisons bien plus fortes que celles que l'on pourrait retrouver dans le milieu naturel avant que la neige glisse sous la forme d'une avalanche. Ce constat préliminaire requiert cependant des recherches supplémentaires pour connaître le degré d'inclinaison critique au-delà duquel les avalanches ont une plus forte probabilité de se déclencher.
- Malgré les différences de caractéristiques de la neige usée par comparaison à celle retrouvée en milieu naturel, **on peut tirer profit des connaissances des avalanches en milieu naturel.** En effet, il existe plusieurs types d'avalanche en fonction de la qualité de la neige et des conditions du milieu dans lequel elles se déclenchent (avalanche de poudreuse, de plaque, de neige humide, superficielle, etc.). Or, sur les sites de neige usée, seuls deux types de décrochement ont été observés et semblent susceptibles de se produire : des avalanches superficielles d'une faible amplitude et des avalanches de plaques pouvant couvrir de grandes superficies.

Les **avalanches superficielles** concernent surtout la neige faiblement consolidée, notamment au moment où la neige est soufflée sur le haut de l'amas, lorsque celui-ci est déjà relativement élevé et que la puissance de la souffleuse atteint sa limite de portée, déposant alors de la neige plus volatile, sous une forme qui peut s'apparenter à de la poudreuse. Cependant, les pentes étant courtes sur les sites de neige usée, ces avalanches n'ont pas la possibilité d'atteindre une vitesse suffisante pour développer un nuage de poudreuse, qui en temps normal représente un danger important pour toute personne se trouvant à proximité. Néanmoins, même sans nuage de poudreuse bien développé, ces avalanches peuvent provoquer des dégâts et constituent alors un certain danger.

À l'inverse, les **avalanches de plaques** sont associées à une neige compacte, et emportent comme leur nom l'indique des plaques de neige épaisses de plusieurs dizaines de centimètres. Leur déclenchement est lié à une fracture (dite « de propagation ») dans le manteau neigeux, laquelle va détacher du reste de la pente une plaque de neige, qui viendra alors « glisser » sur la couche de neige inférieure (plus d'infos dans les « facteurs principaux de déclenchement d'avalanches », page suivante) ; un décrochement qui peut s'étendre sur plusieurs dizaines, voire centaines de mètres de longueur. Ces larges plaques représentent souvent un grand volume de neige dense, ce qui confère à ce type d'avalanche une forte capacité de destruction malgré une courte pente. L'accident mortel qui a eu lieu à Trois-Rivières concernait une avalanche de plaques.

Ainsi, pouvoir cibler les types d'avalanche possibles dans les sites de dépôt de neige usée permet de se concentrer sur les spécificités des facteurs de déclenchement qui les concerne.

Facteurs principaux de déclenchement d'avalanches :

• La qualité de la neige

La forme des cristaux de neige (étoile, aiguille, colonne, dendrite, etc.) ne cesse d'évoluer au cours de la saison hivernale, en fonction des conditions météorologiques et des pressions exercées dans les couches de neige. Or sur les amas, la compaction artificielle, mais aussi les traitements appliqués à la neige depuis son évacuation des routes (neige poussée, soufflée dans des camions, déversée sur les sites et soufflée avec une extrême puissance sur les amas), modifient la forme des cristaux, qui perdent alors leur forme initiale, souvent dendritique, au profit de formes plus petites et irrégulières. Seulement, ces cristaux irréguliers sont moins solidaires les uns des autres, fragilisant potentiellement la solidité et la stabilité du manteau de neige. D'un autre côté, la forte compaction de la neige liée à l'action des souffleuses permet visiblement de maintenir des pentes raides sur les amas. Il est donc nécessaire d'investiguer plus en détail ces aspects pour mieux comprendre la mécanique spécifique à la neige usée et l'impact des agents abrasifs (sel, sable, etc.).

• Le rôle de la météo

Plusieurs facteurs météorologiques sont reconnus comme des causes directes de déclenchement des avalanches de neige, en particulier :

- Les périodes de redoux : avec des températures positives, de fortes pluies, ou encore d'abondantes chutes de neige qui alourdissent le manteau neigeux (voir « les surcharges déclenchant les avalanches » ci-dessous pour plus d'informations).
- La pluie verglaçante : elle favorise des conditions de déclenchement avec un certain délai de temps, c'est-à-dire suite aux chutes de neige à venir après la pluie verglaçante. En effet, la croûte de glace alors formée par la pluie constitue un excellent plan de glissement pour la neige qui s'y dépose et ce, autant en milieu naturel que dans les sites d'entreposage de neige usée.

La compréhension fine de ces scénarios météorologiques favorables aux avalanches de neige, et leurs véritables impacts sur les amas de neige usée, nécessite toutefois des données climatiques et météorologiques à haute résolution, c'est-à-dire à proximité des sites étudiés. Ces données permettront ensuite d'identifier des seuils quantitatifs au-delà desquels le risque d'avalanche s'intensifie, et ce aux échelles locales et régionales. Par ailleurs, il sera nécessaire d'inclure des analyses tenant compte de scénarios futurs liés aux changements climatiques, qui vont avoir un impact sur la fréquence et l'intensité de ces événements climatiques, afin d'adapter rapidement des mesures de précaution.

• Les surcharges déclenchant les avalanches

D'un point de vue mécanique, la mise en mouvement des avalanches de neige résulte généralement d'un effet de surcharge, c'est à dire une déstabilisation du couvert de neige sous l'effet d'un poids additionnel autre que la gravité. Dans le milieu naturel, cela se produit par exemple lors du passage d'un skieur. Cependant, ces surcharges sont souvent liées à des causes naturelles telles que la pluie ou des températures positives qui favorisent la fonte de la neige en surface, la rendant plus dense (la neige « mouillée » étant plus lourde que la neige dite « sèche »), ou encore des chutes de neige additionnelle qui alourdissent le manteau neigeux. Mais cela peut aussi provenir d'actions humaines, comme dans les sites d'entreposage de neige usée, avec l'activité des souffleuses qui ajoutent successivement des couches de neige denses, et donc lourdes, sur les amas. Encore une fois, des suivis à plus long terme sont nécessaires pour bien caractériser les zones critiques plus sensibles sur les amas de neige, ainsi que les seuils quantitatifs de surcharge qui génèrent des avalanches.

Sur les pratiques de gestion des sites de dépôt de neige usée

- **Certaines pratiques observées montrent des situations à risque qui devraient rapidement être prises en charge pour trouver des alternatives.**

- Un exemple : des **camions circulant au pied de longues pentes** (illustration 1), étant exposés au danger d'avalanche tout au long de ce parcours. Alors que ce constat et cette nécessité d'apporter des modifications au plan de circulation peut être rapidement établi, la délimitation de la zone à risque en bas de pente reste encore à définir pour établir un plan de circulation sécurisé. Dans l'intervalle, s'il y a des possibilités pour que les sites proposent déjà une déviation du chemin de circulation bien au-delà de la zone sensible en bas de pente, en prenant de la marge, pour que les camions ne soient exposés au pied des pentes « que » pendant leur déchargement, les sites sont encouragés à le faire.



Illustration 1

Camions circulant sur de longues distances en contrebas des amas de neige

- **Certaines pratiques observées sont probablement à risque, mais il est nécessaire de poursuivre les recherches pour connaître l'ampleur du risque qu'elles provoquent et les alternatives viables** qui pourraient les remplacer.

- Un exemple : la **découpe de la base des amas de neige par les souffleuses** (illustration 2). Entailler la base d'une pente enneigée revient à réduire sa stabilité, en créant un « appel au vide ». Dans ce cas, deux éléments importants entrent en matière : la hauteur de la découpe et le degré de compaction de la neige.

D'une part, la hauteur de la découpe est un facteur majeur (illustration 3), car plus l'entaille est haute, plus elle coupe un grand nombre de couches de neige. Comme parmi ces couches il en existe des plus « fragiles » que d'autres, ou certaines qui favoriseraient un « glissement » de la neige, une grande découpe en bas de pente augmente alors le risque de créer des conditions favorables au déclenchement des avalanches en déstabilisant plusieurs couches de neige. Cependant, la création de ces couches de neige « fragiles » étant grandement dépendantes de la météo (voir ci-avant « Le rôle de la météo », p. 5), des recherches sont nécessaires pour connaître les conditions météorologiques les plus favorables à leur apparition.



Illustration 2

Une découpe de bas de pente sur toute la longueur de l'amas

D'autre part, un autre facteur important concerne le fort degré de compaction de la neige usée sur ce genre d'amas, qui modifie probablement la stabilité des pentes en comparaison avec des situations rencontrées dans le milieu naturel (voir ci-avant « La qualité de la neige », p. 5), jusqu'au point où ces amas supportent peut-être mieux les entailles en bas de pente que dans les milieux naturels, mais jusqu'à un point critique tout de même. Il est donc nécessaire de pousser les recherches sur l'éventuelle fragilisation des pentes par les souffleuses afin d'envisager des recommandations de limitation de hauteur d'entaille en bas de pente, ou des alternatives pertinentes, tenant compte bien entendu des possibilités et limites de la machinerie pour entasser la neige.



Illustration 3

La hauteur de la découpe atteint parfois jusqu'à 2-3 mètres

- Un autre exemple : les **paliers parfois peu marqués sur les pentes** des amas de neige. Bien que les directives de construction des amas peuvent différer d'un site à l'autre, pour les sites qui prévoient des paliers (illustration 4), des observations de terrain ont mis en lumière le faible marquage de certains paliers (illustration 5). On peut parfois en voir dans les pentes, mais certains sont si courts par comparaison à la longueur de la pente qu'on doute qu'ils puissent jouer leurs rôles. En effet, si les paliers ont pour but d'augmenter la stabilité de la pente en subdivisant la pression exercée par la neige, ils ont aussi le pouvoir de limiter la distance d'arrêt des avalanches en cassant la vitesse et le volume de celles-ci dont une partie de la neige qui glisse est retenue par ces paliers.

Dans ce cas, on peut se questionner sur la nécessité de mieux former le personnel en charge de la construction des amas, avec deux éléments notamment :

- S'assurer que le risque d'avalanche est bien compris des travailleurs, afin que ceux-ci comprennent l'importance des paliers et s'assurent de les construire adéquatement.
- Fournir au personnel les moyens d'estimer l'inclinaison de la pente et d'estimer la



Illustration 4

Paliers bien visibles sur la pente



Illustration 5

Paliers insuffisamment marqués par rapport à l'inclinaison et la longueur de la pente

taille des paliers. Du fait de sa position en bas de l'amas et des conditions de visibilité possiblement réduite par la météo ou par le « nuage » de neige soufflée par la machine, comment s'assurer que le travailleur a effectivement la possibilité de lui-même évaluer les paliers ? Sinon, quel autre moyen pourrait être mis en place pour que le travailleur ait cette information ? Des pistes à creuser.

- L'analyse de trois cas d'avalanches majeures avait pour but d'explorer les types de données disponibles (météorologie, caractéristiques des amas, etc.). Bien qu'une analyse complète nécessiterait la comparaison d'un plus grand nombre de cas, il en est ressorti que les trois avalanches sont survenues rapidement après une opération de déneigement et donc d'entassement de la neige, et non pas entre deux opérations où l'évolution de l'amas aurait par exemple été uniquement imputable aux conditions météo. **Le fait que ces avalanches majeures aient toutes eu lieu au moment de l'entassement ou brièvement après questionne d'autant plus sur les pratiques et les recommandations de « cadrage » des directives de construction des amas** (inclinaison et hauteur de la pente, orientation, etc. Voir aussi ci-avant « Les surcharges déclenchant les avalanches », p. 5), ainsi que sur le degré d'exposition des travailleurs qui se trouvent alors sur les sites au moment du déclenchement des avalanches.

Cependant, il ne s'agit de l'analyse que de trois cas d'avalanches, qui ne peuvent résumer l'entier des situations possibles, et il est par ailleurs connu que d'autres avalanches ou décrochements de neige peuvent survenir entre deux opérations de déneigement, ou que les variations météorologiques entre deux opérations de neige peuvent fragiliser la stabilité des pentes lors des opérations d'entassement suivant cette période.

- L'analyse cartographique des sites a également permis de consolider une hypothèse : **l'orientation des amas de neige vis-à-vis des vents dominants est un facteur supplémentaire favorisant le déclenchement des avalanches**. Cette affirmation nécessite toutefois aussi des études supplémentaires pour être confirmée et bien comprise.

Ces observations ont été faites en comparant certains sites sur lesquels pratiquement aucune d'avalanche ne survient et d'autres sites qui cumulent régulièrement des cas. Sur ces derniers, il a été constaté que la neige est toujours soufflée face aux vents dominants, ce qui accentue l'inclinaison de la pente et favorise la formation de corniches. Dans ce contexte, la neige soufflée par le vent atténue la construction des paliers et les ruptures de corniches qui surplombent la pente favorisent les avalanches.

Sur la méthodologie

- L'une des difficultés majeures constatées durant cette saison hivernale, et en envisageant les prochaines, concerne **la synchronisation entre le besoin des spécialistes en avalanches d'observer le dépôt de neige une fois l'avalanche survenue, de l'analyser sur le terrain et d'en tirer des leçons (type d'avalanche, taille, distance d'arrêt, épaisseur de la couche de neige glissée, nature du plan de glissement, etc.), et le besoin des équipes de travail de rapidement remettre le site en état de fonctionner pour reprendre les opérations de déneigement**, qui ne peuvent être décalées dans le temps, et qui ne doivent idéalement pas prendre de retard afin de limiter le temps et le coût des opérations. Seulement, l'équipe de recherche n'étant pas sur place et n'étant pas toujours disponible immédiatement pour rejoindre les sites (localisation du site par rapport à leur lieu de travail ou de domicile, opérations de déneigement de nuit, etc.), il leur faut de toute façon plus de temps pour atteindre l'avalanche que les travailleurs du site, déjà sur place, qui s'affairement immédiatement à le rétablir.

Par ailleurs, on parle d'équipe de recherche, mais seul Daniel Germain peut être concerné en continu par cette recherche, ses collaborateurs ayant participé au suivi sont engagés contractuellement pour certaines tâches, il n'est pas possible de leur demander d'être disponible en tout temps, notamment de nuit, pour rejoindre des sites en cas d'avalanche.

- **L'accès au site est également une difficulté pour les personnes qui n'y sont pas employées**, comme l'équipe de recherche. Que ce soit en cas d'avalanche ou durant les opérations d'entassement de la neige, deux moments cruciaux pour cette étude, l'accès au site pour des « observateurs » externes n'est pas compatible avec les règles de sécurité, excluant toute personne hors des machines de chantier à proximité des amas de neige. Lors des deux saisons de suivi, nous avons pu bénéficier de l'accompagnement de collaborateurs des sites, mais ceci représente peut-être une contrainte pour eux ; il est alors nécessaire de discuter des futurs accès pour accommoder tout le monde.
- Pour pallier à ces difficultés de concilier la présence d'observateurs de terrain et la sécurité des opérations, et parce que cela a déjà pu être testé, **l'installation de caméras est une alternative intéressante**. Avec du matériel en permanence sur les sites, cela permet d'observer les techniques et les pratiques de construction des amas, mais aussi les cas d'avalanches, qui peuvent également survenir lorsque les opérations d'entassement sont terminées et lorsqu'il n'y a personne sur le site pour en témoigner.

Toutefois, si l'installation de caméras devait se multiplier, il sera utile de profiter de l'expérience des travailleurs et des gestionnaires pour choisir les sites à équiper (diversité de sites en termes d'avalanches, de tailles de sites, de situations géographiques et météorologiques, de pratiques de construction des amas, etc.), sachant qu'il ne sera pas envisageable d'équiper tous les sites. L'installation de caméras requiert également le respect de règles usuelles, notamment la nécessité d'en informer les travailleurs.

Points-clés du suivi à l'hiver 2018-2019

Sur la neige

- Les caractéristiques de la neige usée sont très différentes de la neige en milieu naturel, ce qui ne permet pas d'appliquer directement les méthodes usuelles d'étude de la neige.
- Malgré les différences, les connaissances sur les avalanches en milieu naturel permettent de proposer des méthodologies pour mieux comprendre les avalanches de neige usée, en explorant les types d'avalanches les plus susceptibles de se produire et les facteurs de déclenchement connus (facteurs physiques, facteurs météorologiques, morphologie des amas, etc.).

Sur les pratiques de gestion

- Certaines pratiques à risque peuvent être rapidement identifiées (par ex : camions roulant longuement au pied des amas), alors que d'autres sont à priori problématiques (par ex : découpe de la base des amas de neige par les souffleuses, construction de paliers insuffisants) mais nécessitent d'approfondir les recherches pour savoir dans quelle mesure elles le sont. Dans tous les cas, il sera nécessaire de poursuivre les analyses et réflexions pour étudier des alternatives pertinentes à ces pratiques.
- La comparaison de trois avalanches majeures récentes met en évidence qu'elles se sont toutes déclenchées pendant les travaux d'entassement de la neige ; les pratiques appliquées sur les sites sont alors probablement des facteurs favorisant le déclenchement, et non pas seulement les conditions météorologiques, même si celles-ci ont sûrement un rôle fondamental.
- L'orientation des amas face aux vents semble être un facteur non-négligeable. Une comparaison entre des sites ayant régulièrement des avalanches et d'autres qui en sont dépourvus montre une corrélation entre l'orientation de la projection de la neige par les souffleuses, la direction des vents dominants et l'occurrence des avalanches.

Sur la méthodologie

- Une difficulté majeure concerne la synchronisation entre le besoin des spécialistes en avalanches de venir observer sur le terrain les avalanches qui surviennent et leurs caractéristiques, et le besoin des équipes de travail à remettre rapidement le site en état de fonctionner pour reprendre les opérations de déneigement.
- La conciliation n'est pas toujours simple entre le besoin de l'équipe de recherche d'accéder aux sites pour leurs observations de terrain, et les normes de sécurité excluant la présence de qui que ce soit hors des machines (camions, souffleuses, etc.) à proximité immédiate des amas de neige.
- L'installation de caméras est une alternative intéressante, mais l'équipement des sites doit tenir compte des contraintes budgétaires et doit alors idéalement être pensé à l'échelle de la province pour obtenir des images couvrant une variété de types de sites.

Et pour la suite ?

- Au fil des deux saisons de la phase exploratoire du suivi des sites de dépôt et d'élimination de neige usée, **les villes ont confirmé leur besoin de conseils sur les bonnes pratiques à mettre en œuvre pour limiter l'exposition de leurs travailleurs au danger d'avalanche.** Il a également été confirmé par cette phase initiale de l'étude que les connaissances ne sont pas suffisamment solides à l'heure actuelle pour proposer de manière fiable de telles mesures.

De plus, la grande diversité des sites à travers le Québec (climat, quantité de neige, *timing* des opérations de déneigement, procédures de déneigement, procédure de construction des amas de neige, gestion des sites, configuration des sites, etc.) **nécessite un travail plus approfondi pour proposer des mesures applicables par les différentes villes ou pour différencier les recommandations en fonction des caractéristiques des différents types de sites.**

- Pour approfondir cette étude, trois volets principaux doivent être considérés :
 - **La neige :**
 - **Connaissances sur les caractéristiques de la neige :** type de neige, caractéristiques de la neige soufflée par rapport à de la neige « naturelle » (des enjeux de la compaction jusqu'aux facteurs microscopiques tels que la forme des cristaux de neige qui déterminent la stabilité des couches de neige), rôle des agents abrasifs sur la stabilité de la neige usée, etc.
 - **Connaissances de l'évolution du type de neige au cours de la saison,** qui suit l'évolution habituelle de la neige au fil des mois avec les cristaux de neige qui ne cessent de se modifier sous la pression de la couche de neige et en fonction des conditions météorologiques, ce qui influence la stabilité des pentes enneigées et ainsi le déclenchement des avalanches. Mais cette connaissance des conditions usuelle doit toutefois être adaptée aux conditions particulières de la neige usée, et notamment son intense compaction dès l'étape d'entassement sur les amas, qui modifie profondément ses caractéristiques et son évolution au cours de la saison.
 - **Les conditions météorologiques :**
 - Étude statistique et modélisation des **facteurs météorologiques favorables à l'occurrence d'avalanches** de neige, sur la base des données existantes pour les sites de neige usée, et à plus large échelle, pour mieux comprendre l'influence du contexte climatique et géographique (analyse quantitative des redoux hivernaux, des tempêtes de neige, des épisodes de pluie et pluie verglaçante, etc., en fonction des différentes régions du Québec).
 - Identification de l'importance des différents **facteurs météorologiques de surcharge** (pluie, redoux et chutes de neige).
 - **Les pratiques en vigueur sur les sites :**
 - Pour conseiller des recommandations de bonnes pratiques, il sera nécessaire de d'abord **approfondir les connaissances sur les pratiques existantes** (construction des amas, plans de circulation, etc.), identifier les pratiques « exemplaires » dont peuvent s'inspirer d'autres sites, identifier les pratiques à risque.
 - À partir de cet état des lieux et des premières analyses, il sera alors envisageable de **tester différentes pistes à expérimenter**, en collaboration étroite avec les villes partenaires, permettant ensuite de formuler des recommandations.

L'ensemble de ces étapes nécessite d'autres recherches et études de terrain, notamment sur d'autres sites que ceux de Montréal et Trois-Rivières, afin **d'englober les spécificités de l'ensemble des villes concernées sur le territoire québécois**, en tenant compte en particulier des variations liées au contexte climatique, aux quantités de neige usée à évacuer des rues et à entasser dans les sites de dépôt, ainsi qu'à la diversité des pratiques adoptées sur les sites.

- **Une collaboration indispensable avec les acteurs de terrain**

À ces perspectives pour les futurs travaux de recherche s'ajoutent le partenariat et **l'implication essentielle des villes, incluant les gestionnaires de sites et les sous-contractants** le cas échéant. Ceci permettrait en effet de mieux intégrer les défis techniques et logistiques reliés à la gestion et l'entassement de la neige usée, mais aussi d'assurer le réalisme et la faisabilité des propositions qui émaneront du projet d'étude pour la réduction de l'exposition des travailleurs au risque d'avalanche de neige.