

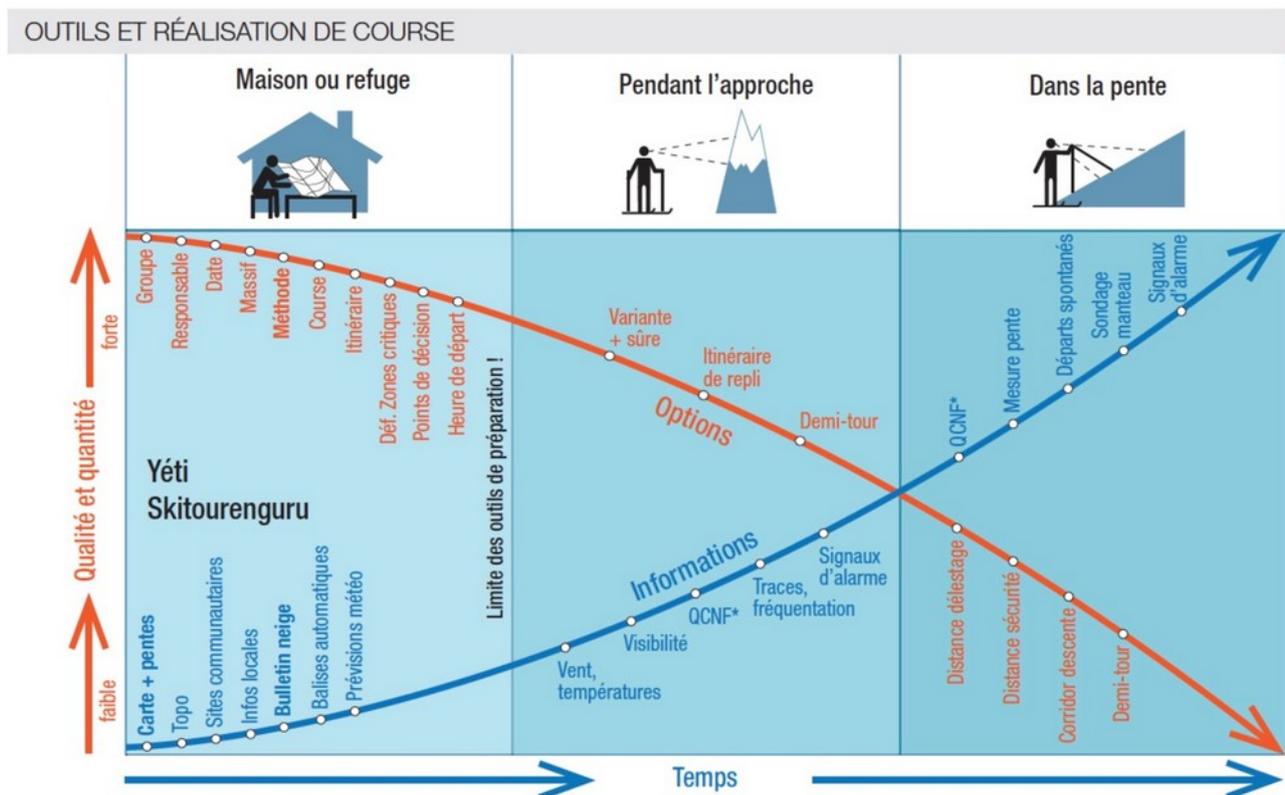
Les algorithmes dans l'évaluation des risques d'avalanche

par Günter Schmudlach & Jochen Köhler

Les algorithmes se frayent un chemin dans tous les domaines de notre existence. Afin d'estimer plus objectivement le risque d'avalanche et prévenir les accidents, l'application Skitouren guru fait appel à eux. Si certains s'en inquiètent, l'analyse des données de masse par des systèmes informatiques puissants améliore nos capacités de prévision et de prévention. Mais ce phénomène naturel recèle encore tellement d'inconnue qu'il laissera encore longtemps une large place à l'individu pour estimer les risques sur le terrain.

Un consensus en matière d'étude des avalanches : la grille 3x3

Le guide et nivologue suisse Werner Munter a déterminé trois phases dans une sortie à ski : la préparation à la maison, l'évaluation au départ de la course puis l'analyse du risque dans la pente. À chaque phase, le pratiquant prend une décision sur la base des informations à sa disposition. À chaque nouvelle phase, la qualité et la précision des informations augmentent, tandis que le nombre de choix d'itinéraires possibles décroît (Figure 1).



Plus on avance dans la préparation puis la réalisation d'une sortie, plus les informations disponibles sont nombreuses et précises, mais plus l'éventail des choix de conduite de course se réduit.

*QCNF : Quantité critique de neige fraîche.

Figure 1 : Modélisation des phases d'une sortie à ski : l'information augmente, le nombre d'options possibles se réduit.

Pour simplifier la représentation de ce modèle, on peut diviser une randonnée à ski en deux phases : la préparation à la maison et la réalisation du projet sur le terrain.

À la maison le skieur prend des décisions sur la zone et l'itinéraire de la randonnée. Ces décisions influent de manière décisive sur le risque d'avalanche qu'il prendra lors de la sortie. L'utilisation des informations déjà disponibles dès le début de la préparation (bulletin d'avalanche, caractéristiques du terrain...) est particulièrement importante pour sélectionner un itinéraire adapté aux conditions, au terrain et au groupe.

Pour traiter ces informations, les méthodes dites probabilistes (par ex. la méthode de réduction graphique¹, SnowCard², StopOrGo³) jouent un rôle décisif. Ces méthodes permettent de prendre une décision radicale du type « j'y vais » ou « je renonce (et je vais ailleurs) » en s'appuyant sur la nature du terrain (principalement son inclinaison) et le bulletin d'avalanches (en premier lieu le degré de danger annoncé). Les méthodes probabilistes sont caractérisées par leur objectivité, leur simplicité et leur reproductibilité. Elles limitent certes la liberté de mouvement, mais les experts en avalanches reconnaissent qu'elles peuvent réduire sensiblement le risque d'avalanche. Le gros problème des méthodes probabilistes est d'une autre nature : elles ne sont encore que rarement utilisées (Landrø, 2020⁴).

Sur le terrain, les méthodes dites analytiques jouent un rôle clé. Les informations suivantes entrent en ligne de compte dans l'analyse : réflexions sur les situations avalancheuses typiques, signaux d'alarme observés, facteurs humains, identification de microterrains, profils neigeux, tests de stabilité. Les outils ne manquent pas pour accompagner la prise de décision sur la base de ces informations : estimation du risque dans la pente (« Décider dans la pente » dans le dépliant « Attention Avalanche ! »), analyse des situations avalancheuses typiques (« Musteranalyzer »), Nivocheck, Nivotest (R. Bolognesi), Vigilance encadrée (A. Duclos), cartographie des vigilances (P. Grobel), diagnostic systématique du manteau neigeux (SSD), etc. (Landrø, 2020)⁵. Les méthodes analytiques laissent beaucoup de liberté, mais elles posent également un problème majeur : un manque de clarté quasi total sur les critères qui conduisent à prendre une décision. Le prix de la liberté est donc un haut degré de subjectivité, un manque de reproductibilité et une base scientifique insuffisante.

Skitourenguru aujourd'hui

Skitourenguru classe tous les jours des milliers d'itinéraires de ski de randonnée en trois catégories : verte (risque d'avalanche modéré), orange (risque accru) ou rouge (risque élevé). Les amateurs de sport d'hiver peuvent accéder de manière simple et rapide à une liste d'itinéraires dont le risque d'avalanche est modéré. Cette évaluation se base sur les informations pertinentes disponibles au stade de la préparation. Elles prennent notamment en considération le bulletin d'avalanche et le terrain.

Alors que les méthodes probabilistes classiques s'appuient sur l'inclinaison du terrain, le degré de danger prévu par le bulletin et parfois les zones dangereuses correspondant à une altitude et une exposition critique signalées dans celui-ci, Skitourenguru propose trois avancées déterminantes :

1 - Skitourenguru se base sur une analyse approfondie du terrain avalancheux. La question centrale reste d'évaluer dans quelle mesure un point donné du terrain se prête à un déclenchement d'avalanche par un skieur. Les critères retenus pour cette évaluation ne se limitent pas à la déclivité, mais englobent également la taille et la forme de la pente ainsi que la couverture du sol (densité du couvert forestier).

2 - Skitourenguru réalise un traitement quantitatif des informations sur les zones dangereuses (altitude et exposition critiques).

3 - Pour éviter les effets de seuil, Skitourenguru effectue une interpolation des données dans les zones de transition, par exemple entre deux zones présentant des degrés de danger différents.

Les méthodes probabilistes classiques s'appuient en partie sur des tests de stabilité, mais surtout sur le nombre d'accidents. Toutefois, les pratiquants ne fréquentent que certaines pentes. La fréquence des accidents est donc influencée de manière décisive par la fréquentation des skieurs.

Prenons un exemple : à partir de 38° d'inclinaison, la fréquence des accidents baisse. On en a déduit à tort que les pentes de plus de 40° sont moins dangereuses que celles de 35°. Mais cette baisse du nombre d'accidents est surtout liée à la faible fréquentation des pentes les plus raides (Figure 2). La fréquence des accidents doit donc impérativement être corrélée à la fréquentation des pentes par les skieurs.

En se basant sur des méthodes statistiques modernes et en incorporant les données de 1600 accidents d'avalanches et de 48 000 km de traces GPS, Skitourenguru apporte une nouvelle méthode probabiliste plus fine : la méthode de réduction quantitative (MRQ) (Schmudlach et coll., 2018⁶ et Schmudlach, 2019⁷).

L'algorithme de Skitourenguru invite à adopter un comportement prudent : en payant un « prix » modeste – renoncer de manière ciblée à certaines courses – jusqu'à 80 % des accidents d'avalanche pourraient être évités. Le projet est soutenu par le Bureau suisse de prévention des accidents (BPA) et la Fondation Petzl, recommandé par le Club Alpin Suisse (CAS) et mentionné dans le document « Attention avalanches » validé par toutes les organisations de prévention et de formation suisses.

Pour faciliter la prise de décision sur le terrain, Skitouren guru indique les passages clés, c'est dire ceux dont la propension au déclenchement d'avalanche est la plus importante. Toutefois, Skitouren guru n'est pas à même de traiter les informations auxquelles on n'accède que sur le terrain comme les conditions neigeuses et avalancheuses d'une pente particulière, qui peuvent être différentes des prévisions à l'échelle d'un massif. Skitouren guru ne doit donc pas être le seul élément de décision pour s'engager dans une pente.

Nous mettons ici le doigt sur une question de communication. Si cet outil est très utile dans la phase de préparation, il présente des limites évidentes lors de la sortie elle-même. Ce n'est pas toujours évident de l'expliquer aux utilisateurs. Bien distinguer les phases d'analyse et de prise de décision à la maison puis sur le terrain reste l'un des grands défis de la prévention des accidents d'avalanche.

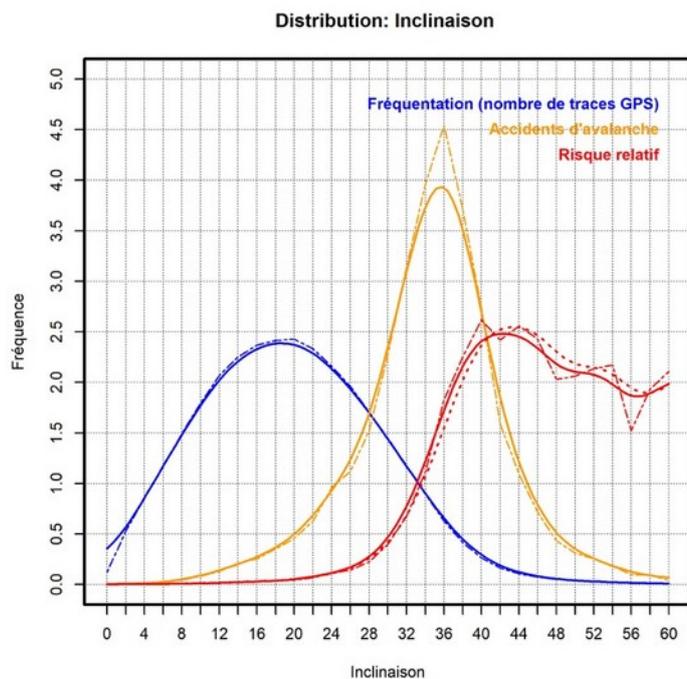


Figure 2 : Les accidents se produisent le plus souvent sur des pentes entre 34 et 38° d'inclinaison (courbe orange). Les randonneurs à ski préfèrent les terrains présentant une déclivité autour de 19° (courbe bleue). En divisant la fréquence des accidents par la fréquentation, on obtient une courbe de risque (courbe rouge). Entre 28 et 40°, le risque augmente de façon constante jusqu'à 42° ; au-delà, il reste élevé. Il n'y a donc pas de véritable baisse du risque avalancheux au-delà de 40°. Les lignes en pointillés correspondent aux données brutes, les lignes continues à un léger lissage des données.

Skitouren guru demain – vers un nouveau modèle de calcul du risque

La méthode de réduction quantitative (MRQ) constitue la clé de voûte de Skitouren guru. Elle se base sur deux indicateurs :

L'indicateur de terrain (IT) décrit pour chaque point du terrain sa propension au déclenchement d'une avalanche. IT est calculé sur la base du modèle numérique du terrain fourni par les services topographiques (SwissTopo, IGN, etc.).

L'indicateur de danger (ID) décrit le niveau du risque avalancheux actuel à un point donné du terrain. ID est calculé grâce aux informations du bulletin d'avalanche.

Ces deux valeurs (IT et ID) sont évaluées pour chaque accident d'avalanche connu et chaque point d'une grande quantité de traces GPS de randonnées à ski. En combinant les accidents et la fréquentation, on peut en déduire un niveau de risque (Figure 3). La MRQ permet d'évaluer le risque relatif de déclenchement d'une avalanche pour un degré de danger spécifique, en chaque point d'un terrain donné.

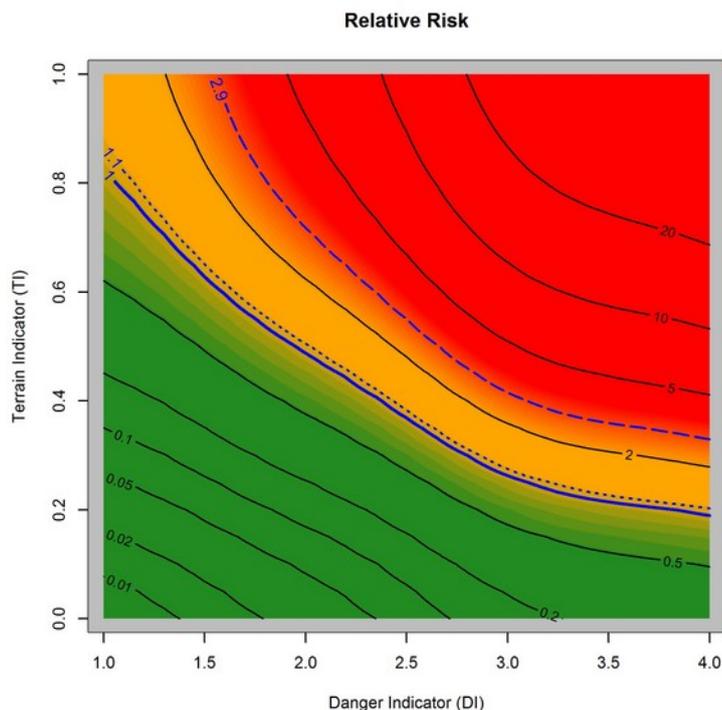


Figure 3 : À première vue, la méthode de réduction quantitative (MRQ) semble identique à la méthode de réduction graphique, mais elle ne se contente pas d'un indicateur vert, orange ou rouge. Elle fournit une évaluation quantitative du risque. Le risque relatif (les chiffres situés sur les courbes noires) augmente de manière considérable en fonction du degré de danger (axe horizontal) et de l'indicateur de terrain (axe vertical). L'indicateur de terrain exprime à quel point le terrain est « propice » au déclenchement d'avalanche. Il ne tient pas compte des conditions de neige et du risque d'avalanches.

Le risque moyen a été fixé à 1. Il double entre la limite des zones verte et orange et la limite entre les zones orange et rouge.

Nos recherches nous conduisent à définir une série de caractéristiques pour chaque point du terrain, par exemple la déclivité, l'altitude, la proximité d'une arête, la forme de la pente, l'indicateur de terrain (IT), la densité du couvert forestier, la distance par rapport au plus proche itinéraire du Club Alpin Suisse (CAS), le risque de chute, etc. Nous exploitons ensuite la totalité des données issues du bulletin d'avalanche actuel, par exemple le degré de danger, le dénivelé jusqu'à l'altitude critique, le fait d'être ou non dans une zone d'exposition critique (zones sombres de la rose des vents), la présence d'une situation avalancheuse typique, l'indicateur de danger (ID), etc. L'algorithme de Skitouenguru traite ainsi plus de 40 paramètres⁸ afin de mesurer lesquels influent le plus sur le risque d'avalanche. La méthode de calcul de la MRQ pourrait à l'avenir intégrer de nouvelles données, si d'autres que celles connues actuellement s'avéraient utiles.

Ces données nous permettent de remplir un tableau. Chaque point du terrain correspond à une ligne reprenant toutes ses caractéristiques. Dans la dernière colonne, nous indiquons s'il s'agit d'un point d'accident ou non. Ces informations sont fournies par la base de données des accidents de l'Institut pour l'étude de la neige et des avalanches de Davos (SLF) pour les points d'accidents et des traces GPS de courses réalisées par des skieurs pour les points sans accident. Nous créons un ensemble de « données d'apprentissage »⁹ (Training data) (Figure 4).

Au cours de la dernière étape du traitement statistiques, nous établissons un modèle sur la base de cet ensemble de données. Il indique les caractéristiques du terrain et les facteurs issus du bulletin d'avalanche ayant une influence sur le risque avalancheux. La nouveauté est que nous ne considérons pas chaque caractéristique individuellement, mais l'ensemble. En définitive, ce modèle représente un concentré de toutes les expériences disséminées dans les « données d'apprentissage » et il nous livre le meilleur calcul de risque possible.

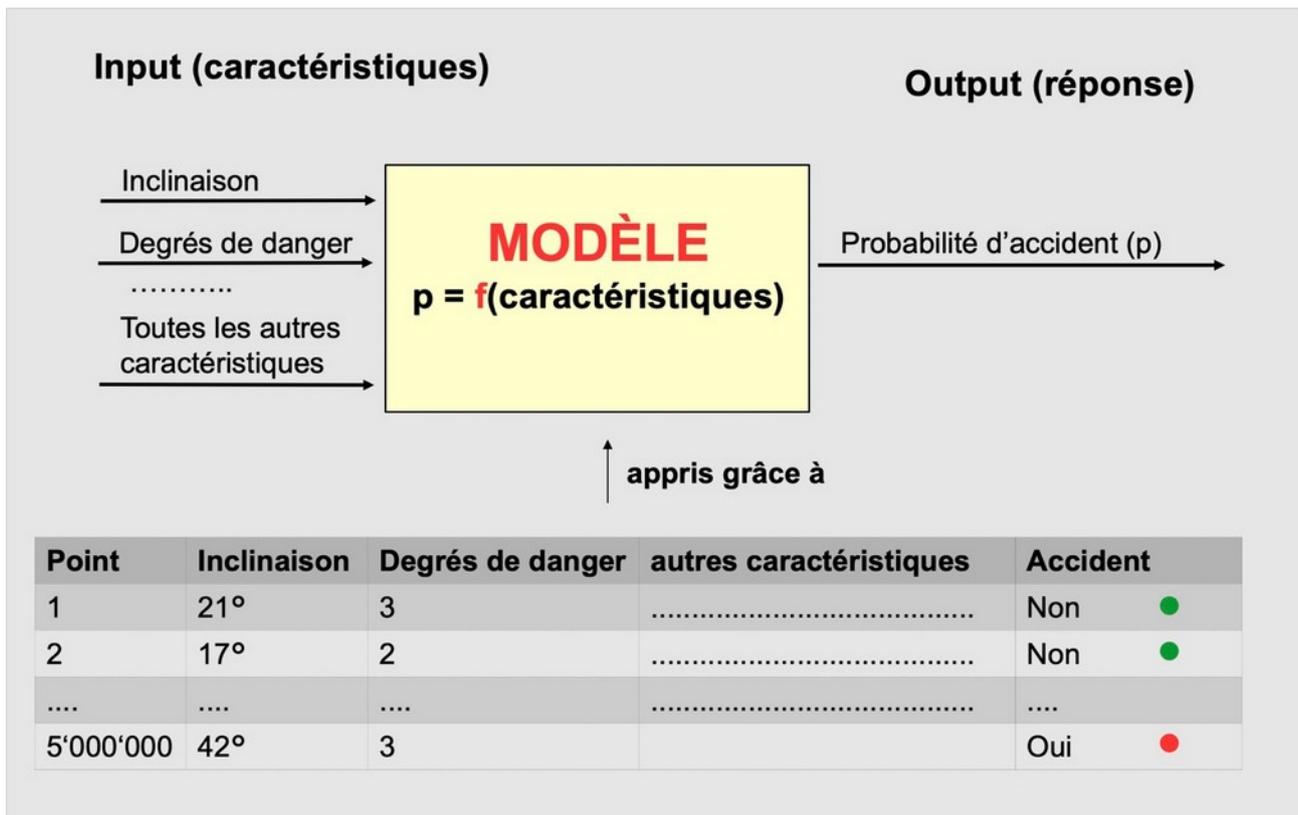


Figure 4 : Modèle généralisé de calcul du risque d'avalanche en fonction de caractéristiques définies.

Nous produisons ainsi des connaissances sur l'influence de chaque caractéristique sur le risque d'avalanche (cf. tableau 1).

Le modèle de Skitourenguru traite les informations disponibles sans émotion. Les « données d'apprentissage » parlent un langage limpide. Elles confirment le rôle déterminant de l'inclinaison de la pente et degrés de danger comme facteurs les plus influents sur le risque d'avalanche. Werner Munter l'affirmait déjà il y a plus de 30 ans !

Très grande influence	Grande influence	Influence limitée	Pas d'influence
Déclivité de la pente (et/ou caractéristiques liées telles que l'IT) Degré de danger (et/ou caractéristiques liées telles que l'ID) Altitude : jusqu'à l'altitude critique telle que définie par le bulletin d'avalanche	Secteurs critiques (rose des vents) Risque de chute Densité de la forêt	Situation avalancheuse typique Forme du terrain	Radioactivité (non testée ;-)

Tableau 1 : Influence de différents paramètres sur le risque d'avalanche.

Les algorithmes au service des skieurs

Au-delà du calcul du risque, les algorithmes peuvent rendre de précieux services aux skieurs.

On souhaite calculer le risque d'un itinéraire tracé sur la carte. On désire que l'algorithme détermine a posteriori à quel niveau de risque correspondait notre sortie du jour. La première opération accompagne la préparation d'une sortie. La deuxième propose un retour d'expérience sur ses choix et son comportement. Qu'il s'agisse d'un projet de sortie ou d'une trace GPS, des données sur l'environnement sont nécessaires pour **calculer le risque des itinéraires générés par l'utilisateur**. L'algorithme utilisé est le même que celui de Skitouenguru.

Dans la phase de préparation de course, les skieurs doivent combiner eux-mêmes les cartes des pentes avec les informations du bulletin d'avalanche. À l'avenir, une **carte du risque actualisée tous les jours** leur simplifiera la tâche. Elle compilera la topographie et le bulletin d'avalanche du jour et en déduira le risque d'avalanche qu'elle affichera sur la carte. Pour la Suisse, il existe déjà six exemples de cartes calculées grâce à la MRQ¹.

L'ordinateur peut générer automatiquement des itinéraires de randonnée à skis : A. Eisenhut a développé un algorithme capable de créer automatiquement une **carte de randonnées à skis** incluant différents itinéraires (« corridors ») pour toute une chaîne de montagnes. Une telle carte est déjà disponible sur Skitouenguru² pour tout le territoire Suisse (Figure 5).

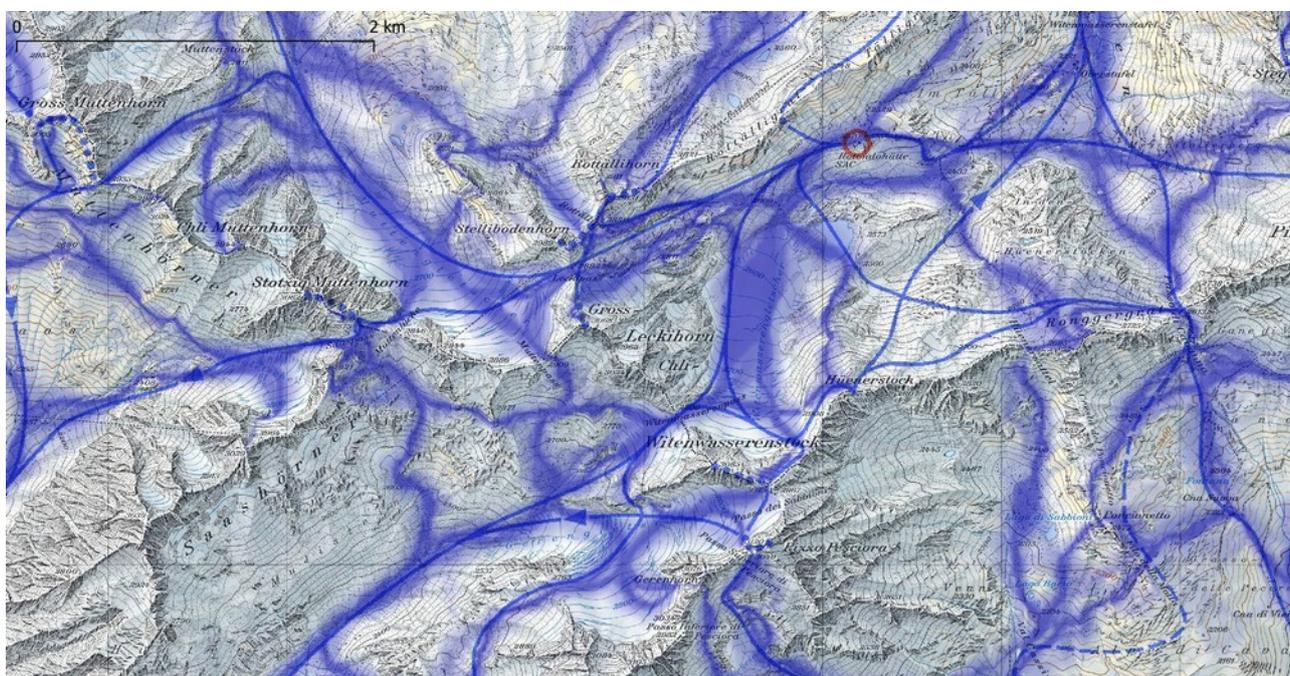


Figure 5 : Carte de randonnées à skis générée automatiquement par A. Eisenhut (carte de base : © Swisstopo).

Le rêve absolu

Pour prévoir les avalanches, il faut disposer d'informations sur l'histoire du manteau neigeux, connaître son état actuel et anticiper ses probabilités d'évolution. Aujourd'hui, les bulletins d'avalanche sont encore majoritairement conçus à la main. Les experts en avalanches collectent, examinent et évaluent une multitude d'informations suivant des procédures qui ne peuvent pas écarter toute subjectivité. Ce procédé implique que les mêmes informations traitées ne mènent pas forcément au même résultat (Lazar et coll., 2016¹⁰). Depuis une bonne décennie, la recherche en avalanches se penche sur un projet de chaîne de modèles complètement objectivés et automatisés. Au départ : des données météo À l'arrivée : une carte

¹ Exemples de cartes de risque pour la Suisse : <https://www.skitouenguru.ch/index.php/services/172-riskmap>

² Lien vers les itinéraires de randonnées complètement automatisés pour la Suisse : <https://www.skitouenguru.ch/index.php/services/208-services-corridors>

dynamique haute résolution de la stabilité du manteau neigeux. Concrètement, il s'agit ici de différents modèles séquentiels combinés (figure 6).

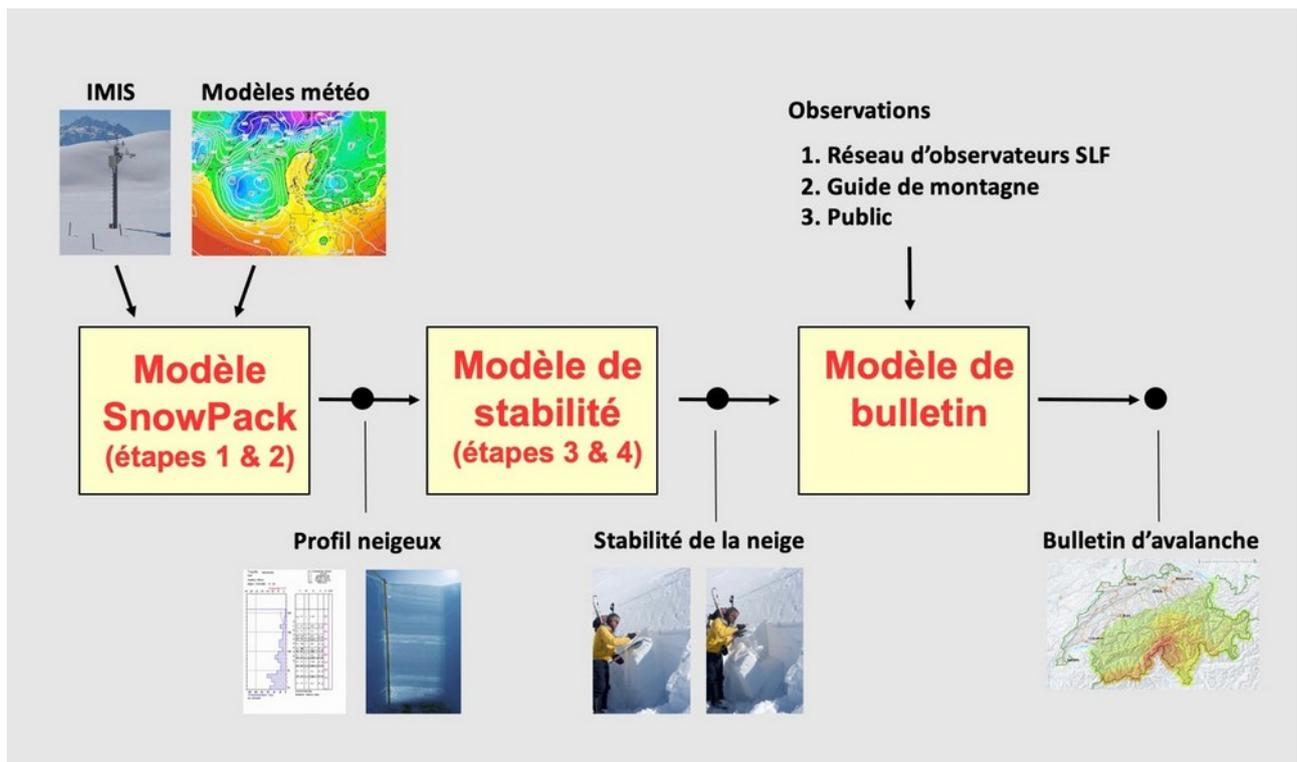


Figure 6 : Chaînes de modèles : depuis les données météo jusqu'à un bulletin d'avalanche généré automatiquement.

Le premier modèle calcule la situation météo actuelle dans le massif, sur la base des prévisions météo suprarégionales et régionales et des données livrées par les stations automatiques de mesure. Il effectue une estimation haute résolution (par ex. avec une précision de 10 m) de valeurs telles que les précipitations, la vitesse du vent, la température, l'énergie du rayonnement, etc. Il va de soi que cette estimation comprend des incertitudes.

Le deuxième modèle simule la composition du manteau neigeux à tous les points de la trame. À l'heure actuelle, il existe deux modèles pour décrire les processus physiques au sein du manteau neigeux : SNOWPACK¹¹ du BPA et CROCUS¹² de Météo France. Ces modèles sont très sensibles. Des différences minimales au niveau des données de départ peuvent modifier la simulation. Cette représentation virtuelle du manteau neigeux ne peut que s'approcher de la réalité.

Le troisième modèle inclut des critères permettant de déterminer d'éventuelles couches fragiles.

Le quatrième modèle estime la stabilité de chaque couche fragile. Il évalue si le passage d'un skieur suffit à amorcer une rupture et si cette dernière peut se propager.

Cette chaîne de modèles permet de générer une carte de stabilité du manteau neigeux sur les semaines passées (historique) et les jours à venir (prévision). Elle peut servir aux prévisionnistes pour préparer le bulletin d'avalanche ou pour alimenter un algorithme tel que Skitourenguru. Cette chaîne de modèles traite des informations qui n'étaient autrefois disponibles que sur le terrain.

Elle soulève toutefois plusieurs problèmes :

Tous les modèles de manteau neigeux développés jusqu'à présent (SNOWPACK, CROCUS) proposent une description unidimensionnelle du manteau neigeux (profil neigeux vertical). Ils ne permettent pas encore de représenter en trois dimensions les interactions à l'œuvre dans le manteau neigeux.

Les modèles du manteau neigeux se focalisent sur le risque posé par la neige ancienne. Il existe pourtant d'autres situations avalanches typiques : la neige soufflée, par exemple, qui peut se révéler problématique en cas de vents au sol très localisés. Les modèles actuels sont à des lieues de pouvoir représenter l'effet de ces vents au sol. Le problème posé par la neige humide est également non résolu à ce jour.

Les modèles du manteau neigeux réagissent de manière sensible aux précipitations. Si la quantité estimée de précipitations varie légèrement, cela peut avoir de fortes répercussions sur le profil neigeux modélisé (Richter et coll., 2018¹³). Il s'agit là d'un point d'une importance d'autant plus cruciale qu'il demeure difficile de mesurer et surtout de prévoir les précipitations (Nitu et coll., 2018¹⁴).

Déterminer la couche fragile pertinente dans un profil neigeux n'est pas une tâche aisée non plus (Monti et coll., 2014¹⁵). Certes, les propositions d'indicateurs potentiels de stabilité ne manquent pas, mais elles n'ont été validées que partiellement et avec des succès mitigés (Morin et coll., 2019¹⁶).

Nous attendons des modèles physiques qu'ils nous livrent une représentation de la stabilité sous la forme d'une probabilité absolue de déclenchement (en cas de surcharge causée par le passage d'un ou plusieurs skieurs). Les indicateurs de stabilité proposés à ce jour sont loin de garantir un tel service.

L'ouvrage de Morin et coll. (2019) dresse un état des lieux des développements actuels. À ce jour, les chaînes de modèles en sont encore au stade expérimental. Les travaux de Richter et coll.¹⁷ (2019) résument ainsi le statu quo scientifique : « *Il est clair que le problème complexe de l'identification automatique des couches fragiles et de l'évaluation de la stabilité de la neige dans les profils de neige simulés n'est pas encore résolu.* ». Morin et coll. (2019) font preuve de la même retenue : « *La possibilité de produire automatiquement des informations sur le risque d'avalanches reste un défi à long terme, voire insaisissable.* » En conséquence, les chaînes de modèles ne jouent qu'un rôle marginal dans le travail quotidien des prévisionnistes (Morin et coll., 2019).

En plus de tous les défis posés par la représentation des phénomènes physiques, il est à notre sens impératif de tenir compte en permanence des incertitudes. Cela permettrait de jeter des ponts entre les méthodes physiques et probabilistes.

La standardisation et l'automatisation plus poussées du processus d'élaboration du bulletin d'avalanche quotidien sont des solutions porteuses d'avenir. Il est nécessaire de continuer à soutenir la recherche dans les chaînes de modèles.

Conclusion

En matière d'estimation des risques d'avalanches, les algorithmes permettent de traiter des ensembles de données complexes et volumineux utiles à la prise de décision. Pour la phase de préparation à la maison, on dispose désormais de modèles de prise de décision efficace. Les algorithmes sont à même d'affiner ces modèles et de les étayer sur une base statistique solide. L'évaluation automatique du risque sur les itinéraires de randonnée à ski avec des applications comme Skitourenguru améliore l'information du grand public et la prévention des accidents d'avalanche.

L'enjeu se situe moins dans le développement des outils que la communication accompagnant leur diffusion. Peu importe la qualité des instruments. Ils ne constituent jamais que la première étape de la gestion du risque et ne remplacent pas l'appréciation de la situation sur place.

Une randonnée à ski implique une série de décisions prises dans un contexte général d'incertitudes que les informations permettent de limiter. Pour ce faire, elles doivent être non seulement pertinentes, mais aussi disponibles. Le bulletin d'avalanche contient des informations pertinentes sur les conditions de neige et d'avalanche et contribue ainsi à limiter les incertitudes durant la phase de préparation. Bien que les informations diffusées dans le bulletin d'avalanche comportent des erreurs et soient généralisées à l'échelle d'un massif, elles permettent néanmoins de réduire l'incertitude dans une pente spécifique. Plus le degré de danger est élevé, plus le danger augmente dans chaque pente. Cette relation de cause à effet est souvent remise en question par des spécialistes. Le degré de danger et la localisation des secteurs dangereux (rose des vents) sont des critères qui peuvent limiter le risque d'avalanche. Un skieur rationnel se doit absolument de prendre en considération le bulletin d'avalanche, lequel détaille ces deux critères, pour évaluer les risques qu'il encourt. Il en va de même pour une pente spécifique. Le fait que le degré de danger et la localisation des secteurs dangereux soient mis en avant en haut du bulletin ne doit rien au hasard¹⁸. Russel & Norvig (2016¹⁹) écrivent dans leur ouvrage de référence sur l'intelligence artificielle : « *Lors de la prise d'une décision, un agent doit s'appuyer sur toutes les informations qu'il a observées* ».

Lors de la phase d'analyse à la maison, beaucoup d'experts s'en remettent encore aux vertus supposées de « l'expérience et de l'intuition ». C'est une jolie formule pour décrire le chaos ambiant. La plupart des raisonnements enseignés sont caractérisés par leur subjectivité, leur manque de reproductibilité et leur base scientifique insuffisante.-

De plus, il y a un monde entre ce qui est enseigné et ce qui est vraiment utilisé dans la pratique. Ce fossé ne concerne pas seulement les sportifs débutants et confirmés, mais aussi les experts. D'où nombre de décisions tout à fait arbitraires dans la pente. Bien souvent, ces décisions ne débouchent heureusement pas sur un accident, mais c'est avant tout lié à la rareté des avalanches.

Dans le cadre des décisions prises dans la pente, on fait volontiers référence à une « intuition basée sur l'expérience ». Sans une remise en question critique de ce concept, la référence à l'intuition ne nous est d'aucune aide. Daniel Kahneman²⁰ (prix de la Banque de Suède en sciences économiques en mémoire d'Alfred Nobel en 2002) mentionne deux conditions sine qua non pour que l'Homo Sapiens développe une « intuition basée sur l'expérience » : premièrement, un environnement suffisamment régulier pour être prévisible. Deuxièmement, l'occasion d'apprendre de cette régularité grâce à des années d'exercices. Ces deux conditions sont loin d'être réunies dans les terrains avalancheux.

L'utilisation des algorithmes se limite donc pour l'instant à la phase de préparation de l'itinéraire. Certains s'en attristeront, d'autres se réjouiront. Il y a, en tout cas, de fortes chances que les paysages alpins enneigés demeurent longtemps un espace privilégié laissant sa juste place à des décisions individuelles dans un contexte d'incertitude.

- ¹ Harvey, S., Rhyner, H., Schweizer, J., 2012. Lawinenkunde. Praxiswissen für Einsteiger und Profis zu Gefahren, Risiken und Strategien.
- ² Engler, M., 2001 : Die weisse Gefahr: Schnee und Lawinen. Erfahrungen - Mechanismen - Risikomanagement, Sulzberg, Verlag Martin Engler.
- ³ Larcher, M., 1999 : [Stop or Go: Entscheidungsstrategie für Tourengesher](#). Berg&Steigen, pp. 18–23.
- ⁴ Landrø, M., Hetland, A., Verpe Engeset, R., Pfuhl, G, 2020 : [Avalanche decision-making frameworks: Factors and methods used by experts](#), Cold Regions Science and Technology.
- ⁵ Landrø, M., R., Pfuhl, Verpe Engeset, G, Jackson, M., Hetland, A., 2019 : [Avalanche decision-making frameworks: Classification and description of underlying factors](#), Cold Regions Science and Technology.
- ⁶ Schmudlach, G., Winkler, K., Köhler, J., 2018 : [Quantitative Risk Reduction Method \(QRM\), a data-driven avalanche risk estimator](#), ISSW, Innsbruck.
- ⁷ Schmudlach, G., 2019 : Méthode de réduction quantitative (MRQ) - [Eine datenbasierte Methode zur Berechnung des Lawinenrisikos für Wintersportler](#), BergUndSteigen 1/2019 (Nr. 106)
- ⁸ Liste d'indicateurs potentiels permettant de prédire le risque d'avalanche : <https://www.skitourenguru.ch/download/data/ARPD.xls>
- ⁹ Dans le domaine de l'intelligence artificielle on distingue les données d'apprentissage et les données de validation. Les données d'apprentissage sont utilisées pour construire l'algorithme. Les données de validation sont un ensemble de données de test pour régler les paramètres de l'algorithme afin de l'améliorer.
- ¹⁰ Lazar, B., Trautman, S., Cooperstein, M., Greene, E., Birkeland, K., 2016 : [North American Avalanche Danger Scale: do backcountry forecasters apply it consistently?](#) ISSW, Breckenridge.
- ¹¹ <https://www.slf.ch/de/services-und-produkte/snowpack.html>
- ¹² <https://www.umn-cnrm.fr/spip.php?article555&lang=fr>
- ¹³ Richter, Van Herwijnen, A., B., Rotach, M.W., Schweizer, J., 2020 : [Sensitivity of modeled snow stability data to meteorological input uncertainty](#), Natural Hazards and Earth System Sciences.
- ¹⁴ Nitu, R., et bien d'autres, 2018 : [WMO Solid Precipitation Intercomparison Experiment \(SPICE\) \(2012–2015\)](#), Instruments and Observing Methods Report No. 131. Tech. Rep., World Meteorological Organization, Geneva.
- ¹⁵ Monti, F., Schweizer, J., Fierz, C., 2014. [Hardness estimation and weak layer detection in simulated snow stratigraphy](#). CRST.
- ¹⁶ Morin, S., 2019 : [Application of physical snowpack models in support of operational avalanche hazard forecasting](#): A status report on current implementations and prospects for the future, CRST.
- ¹⁷ Richter, B., Schweizer, J., Rotach, M.W., Van Herwijnen, A., 2019 : [Validating modeled critical crack length for crack propagation in the snow cover model SNOWPACK](#), The cryosphere.
- ¹⁸ <https://www.avalanches.org/standards/information-pyramid/>
- ¹⁹ Russel, S., Norvig, P., Artificial Intelligence, Pearson, Harlow, 2016.
- ²⁰ Kahneman, D., 2012 : Système 1 / Système 2 : Les deux vitesses de la pensée, Flammarion, 2012.