

ANALYSE SPATIALE DU RISQUE D'AVALANCHES BASEE SUR L'UTILISATION DES MODELES DE SIMULATIONS ET DES SYSTEMES D'INFORMATION

Vers une méthodologie opérationnelle pour la gestion du risque d'avalanche dense

Coordonnée par : Mohamed Naaim
Unité de Recherches ETNA
Cemagref

1 Introduction :

Les avalanches de Février 1999 dans tout l'arc alpin ont toutes dépassé leurs limites maximales connues et pour certaines, la période de retour de la précipitation à l'origine de l'avalanche et la période de retour de l'événement avalancheux lui même, étaient manifestement très différentes.

Des analyses probabilistes à l'image de ce qui se fait en hydrologie et les modélisations récentes des écoulements, peuvent-ils apporter des informations suffisantes pour envisager de dresser une carte probabilisée de l'aléa avalanche ?

L'objet de ce travail a été de poser les fondements théoriques d'un outil d'aide à la décision en matière de prévention d'avalanches en explorant la possibilité de proposer une méthodologie pour la localisation de l'aléa avalanche, basée sur la combinaison d'une approche statistique pour les conditions de productions et des modèle(s) déterministe(s) pour la propagation.

Dans la prévention des risques, deux types de description de l'aléa sont utilisées :

1.1 Le plus fort aléa historique.

Dans ce cas, la carte CLPA, basée sur une enquête de terrain et une photo-interprétation, représente le plus fort aléa historique. En France, c'est cette information qui est utilisée pour le zonage.

1.2 La prédétermination d'un aléa probabilisé

Il s'agit de prédéterminer les aléas (décennal, centennal, tri-centennal) par une démarche prospective. C'est dans ce dernier cadre que nous avons choisi de développer notre méthodologie dont le but est l'obtention de la carte des aléas probabilisés. Cette méthodologie a pour objectif de traiter de façon statistique combinée à des modèles déterministes les différentes phases du phénomène :

- formation,
- déclenchement,
- et propagation

2 Formation 1 : Analyse statistique des précipitations

Les précipitations sont étudiées, critiquées et synthétisées grâce à des méthodes d'analyse des données classiques. L'étude statistique des précipitations cumulées sur trois jours du point météorologique le plus proche du couloir concerné permet de définir la probabilité d'occurrence d'une précipitation donnée sur le site et de déduire sa période de retour.

Ce travail est classique en hydrologie et n'a fait l'objet d'aucun développement méthodologique particulier dans le cadre de ce projet. Par contre plusieurs séries de données ont été traitées en Savoie et en Haute Savoie pour analyser les conditions de production des avalanches dans les couloirs choisis comme site pilote dans ce projet.

3 Formation 2 : Analyse statistique des déclenchements

Il n'y avait jamais eu auparavant de connexion entre les bases de données du recensement des avalanches réalisées dans l'Enquête Permanente des Avalanches qui remonte au début du siècle pour certains couloirs, et les relevés effectués par Météo-France au niveau des massifs depuis 1981. Il s'agissait d'étudier comment la mise en commun de ces deux bases de données pouvait nous permettre d'appréhender le risque de déclenchement d'avalanche dans l'élaboration d'une méthodologie de prévision du risque d'avalanche à trois jours et à plus long terme dans l'évaluation du temps de retour d'une avalanche dans un couloir.

L'étude de la probabilité de déclenchement est obtenue en croisant grâce à des méthodes statistiques multi variables les données nivo-météorologiques avec les données de l'EPA (ou l'activité avalancheuse) pour déterminer la probabilité de déclenchement pour un scénario météorologique donné. Cette probabilité tient compte de l'ensemble des variables caractérisant une situation nivo-météorologique comprenant la hauteur de précipitation, le vent, la température, etc. L'analyse des différentes situations (occurrence, non occurrence) permet de définir la probabilité conditionnelle de l'occurrence en fonction de la hauteur de la précipitation.

Des exemples récents nous ont d'ailleurs montré que des précipitations dont les périodes de retour sont de l'ordre de huit ans pouvaient entraîner des avalanches centennales. On peut en conclure que la valeur des précipitations ne doit pas être la seule variable explicative du phénomène. A partir des données de Météo-France, on a évalué l'importance de la contribution de chacun des paramètres nivo-météorologiques dans la probabilité d'occurrence d'une avalanche dans un couloir donné.

Cette étude a été l'occasion d'analyser l'apport possible de différentes méthodes statistiques pour analyser le risque d'avalanche à partir d'une base de données. On ne prétend pas ici aboutir à des résultats en terme d'algorithmique ou de conception de logiciel (ceux-ci existent, reste à savoir bien les utiliser), mais à une nouvelle méthodologie.

On supposera donc connus un nombre p de paramètres nivo-météorologiques (ces paramètres seront fondamentalement la précipitation, le vent en force et en direction, et la température, mais également d'autres paramètres relevés par Météo-France tels que l'épaisseur totale de neige ou la hauteur de pénétration de la sonde de battage).

Dans ce projet nous avons utilisé pour ce faire la méthode d'analyse des données dite **d'analyse factorielle discriminante**. Cette méthode est en effet adaptée à notre étude, puisqu'elle est à la fois **descriptive** et **prédictive**. On se place dans un couloir donné, pour lequel on dispose aussi bien du relevé exhaustif de toutes les avalanches que de l'historique des conditions nivo-météorologiques depuis une période suffisamment longue. On dispose alors pour notre étude de n observations du couloir décrites par un

ensemble de p paramètres nivo-météorologiques (x_1, \dots, x_p) réparties en deux classes : avalanche, ou non avalanche

Nous avons dans un premier temps, séparé au mieux les deux classes à l'aide des p variables explicatives. Nous avons ensuite cherché à déterminer une probabilité empirique de déclenchement pour une hauteur de neige donnée. Les essais réalisés sur les sites étudiés ont montré que cette analyse permettait de rendre bien compte des effets combinés des précipitations, du vent (qui peut chargé certains couloirs), des effets de la température (suffisamment froide pour que le neige reste très sèche) etc..

4 Formation 4 : Analyse des contributions des différentes zones de départ

Dans le cas où plusieurs zones de départ plus ou moins indépendantes peuvent contribuer à un même événement dans un même couloir, il faut tenir compte, comme cela se fait en hydrologie, de la combinaison des contributions. Cela peut se traiter par l'affectation d'une probabilité de déclenchement simultané de une, de deux, ou de plusieurs zones de départ. Dans les années à venir, on peut espérer disposer de modèles numériques à base mécanique qui pourront être utilisés de manière stochastique pour analyser les différents modes de déclenchement probables dans un couloir donné. Ce genre de modèle (déterministe avec perturbation) pourra nous permettre de définir une certaine probabilité de déclenchement et d'analyser les différentes contributions.

5 Propagation - Ecoulement

Les modèles de propagation sont utilisés pour déterminer l'extension de l'avalanche. Leurs données d'entrée sont : une hauteur de déclenchement, le modèle numérique du terrain et l'identification de la zone de départ. Plusieurs types de modèles peuvent être utilisés en fonction de la complexité du couloir.

Dans les couloirs simples, un modèle de Voelmy est suffisant; par contre, pour les couloirs à géométrie complexe un modèle plus adapté est nécessaire. Ce projet a été le cadre du développement d'un modèle d'écoulement pour les avalanches denses et de la réalisation d'expérimentations in situ sur un canal avec de la neige sèche au Col du Lac Blanc. La modélisation numérique développée traite l'écoulement de l'avalanche depuis son déclenchement jusqu'à son arrêt. L'avalanche est assimilée à un matériau granulaire qui en fonction du taux de cisaillement et de la concentration volumique, est décrit soit par le modèle frictionnel de Mohr-Coulomb, soit par un modèle inertiel issu de la théorie cinétique des milieux granulaires. Ce modèle a été validé sur des mesures expérimentales en modèle réduit réalisées au Col du Lac Blanc. Enfin le modèle a été utilisé pour reproduire des événements d'avalanches majeures réelles bien documentés (5 avalanches).

En plus du modèle numérique du terrain, ce modèle nécessite un paramètre descriptif de la rhéologie. Dans l'hypothèse d'un matériau granulaire, la détermination de l'angle de frottement pour la neige sèche est nécessaire. Dans le cadre de ce projet, nous avons retenu l'hypothèse suivante : les avalanches majeures mobilisent essentiellement de la neige sèche pour laquelle nos expériences nous ont permis de définir l'angle de frottement.

6 Intégration dans un système d'information géographique

Pendant longtemps, les enquêtes de terrain ont été les méthodes principales pour recueillir les informations et dresser les cartes d'avalanches. Etant donnée que

l'avalanche est un phénomène spatial, les Systèmes d'Information Géographique (SIG) ont rendu plus facile la gestion des informations et l'édition de cartes. En effet les SIG peuvent manipuler, stoker, traiter, rechercher et analyser des informations spatiales sous forme digitale et permettre de réaliser des cartes. Ils ont ainsi joué un rôle important dans la cartographie de l'aléa avalanche (Borrel 1994).

En parallèle et à partir de considérations physique et théorique, des recherches ont permis d'établir des modèles numériques capables de simuler la dynamique des avalanches (Naaim 1998). L'utilisation de ces modèles a rendu possible le tracé de la zone d'extension d'une avalanche en utilisant la topographie, les conditions initiales et quelques paramètres décrivant le comportement de la neige. D'autres modèles dits statistiques ont vu le jour et ont joué en Europe du nord (Norvège (Leed 1980), Islande(Keylock 1999)), un rôle important dans l'estimation de l'extension des avalanches et la détermination de la probabilité pour qu'une avalanche atteigne une zone donnée. Les modèles statistiques et les modèles numériques sont restés peu utilisés. Leurs entrées sont complexes à fournir et leurs sorties sont difficiles à exploiter.

Bien que les SIG et les modèles aient parallèlement connu un essor important, aucune tentative de coupler les deux n'a été entreprise. Réalisant le fort potentiel et convaincu de l'important progrès que la combinaison entre les SIG et les modèles numériques peut apporter dans le zonage de l'aléa avalanche, nous avons conduit ce travail visant établir un cahier des charges pour la construction d'un environnement d'intégration des modèles dans un SIG .

Les modèles nécessitent des données d'entrée et fournissent des résultats en sortie. A partir d'une analyse des données nécessaires aux différents modèles en termes d'entrées / sorties, nous avons classé les données d'entrées et les données de sorties pour établir un cadre normatif qu'elles doivent respecter pour être compatibles avec la précision et la qualité attendues. .

Nous nous sommes orientés vers une normalisation de la procédure de réalisation des modèles numériques du terrain et des formats des données d'entrée et de sortie de modèles pour les rendre compatibles avec les formats admissibles par les SIG.

Les modèles numériques ont besoin des données suivantes :

- 1. Des données topographiques de base en vue de réaliser un modèle de terrain ;**
- 2. Des conditions de production et des paramètres de frottement ;**

Les modèles fournissent des données en sortie: le champ de vitesse, le champ de pression et le champ des hauteurs. Ces données doivent être lues par le système et tracées sous la forme de cartes.

Le système destiné à l'intégration des modèles dans un environnement SIG, doit donc comporter :

- 3. Des outils de lecture, de génération, et de stockage des données topographiques et des conditions initiales ;**
- 4. Des outils de lecture et de tracé des résultats.**

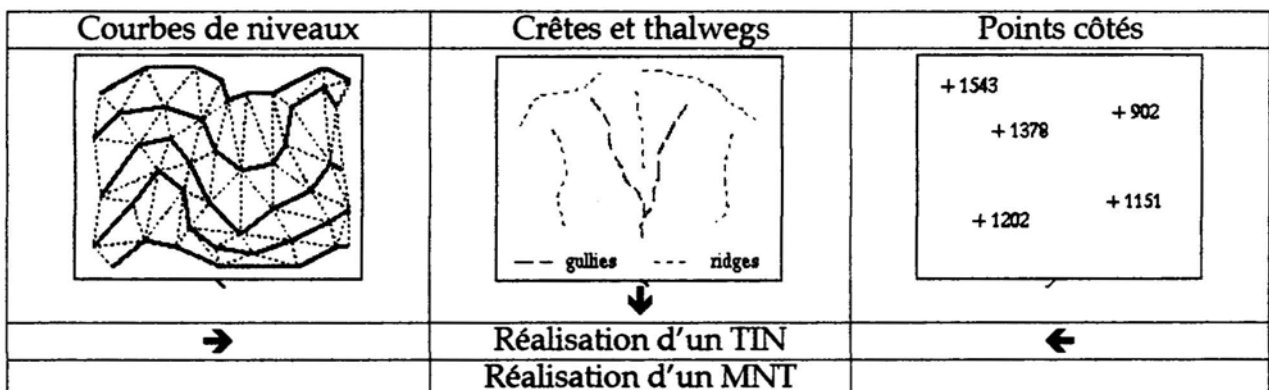
Le système doit aussi permettre de confronter les résultats des modèles à l'ensemble des données existantes telles la CLPA. Cette contrainte a pour objectif de permettre à l'utilisateur de tester la qualité des résultats du modèle en les comparant aux observations disponibles. Toutes les informations topographiques, conditions initiales et résultats doivent être géo-référencés pour être proprement localisés sur une carte.

Les modèles numériques (Naaim, 1998) permettent d'utiliser la topographie dans toute sa complexité. Les équations de la mécanique sont résolues sur un maillage qui s'adapte à cette complexité. La génération des données topographiques d'entrée nécessite la mise au point d'un outil spécifique afin de disposer de l'ensemble des détails de la topographie. En effet plus la donnée topographique sera bonne, plus le résultat du modèle sera précis.

En France, les données topographiques les plus précises (et compatibles avec les besoins des modèles de simulations) sont : la BD topo quand elle existe et des restitutions de photographies aériennes. Le SIG dispose des outils permettant de lire, sous différents formats, ce type de données. Malheureusement, le territoire montagnard n'est pas encore complètement couvert par la BD topo et il n'est pas toujours possible de disposer d'un modèle numérique de terrain. Il faut donc aussi que le système soit complété par un outil de digitalisation à partir du scan d'une carte.

La précision du MNT exigée par les modèles ne peut être obtenue qu'en incluant dans la procédure de sa réalisation les lignes de niveaux, les lignes d'arêtes, les thalwegs, ainsi que les points cotés (figure suivante). Les points cotés, les lignes de niveaux forment un ensemble de points qui doit être complété par les lignes structurantes qui sont les arêtes et les thalwegs. La description la plus générale et la plus flexible pour rendre compte de cette complexité sans rajouter ni enlever de l'information est de construire, à partir des éléments cités, un réseau de triangle irrégulier. A partir de cette forme, il est facile de déterminer la pente et l'orientation des mailles de la grille utilisée par les modèles pour la simulation des avalanches.

Le système doit aussi comporter des outils de lecture des informations sur le couvert du terrain (végétal ou rocheux) pour permettre de définir ce qui est communément appelé la rugosité.



La génération d'un MNT incluant la structure des lignes caractéristiques et les points cotés.

Les entrées des modèles numériques restantes peuvent être divisées en trois catégories:

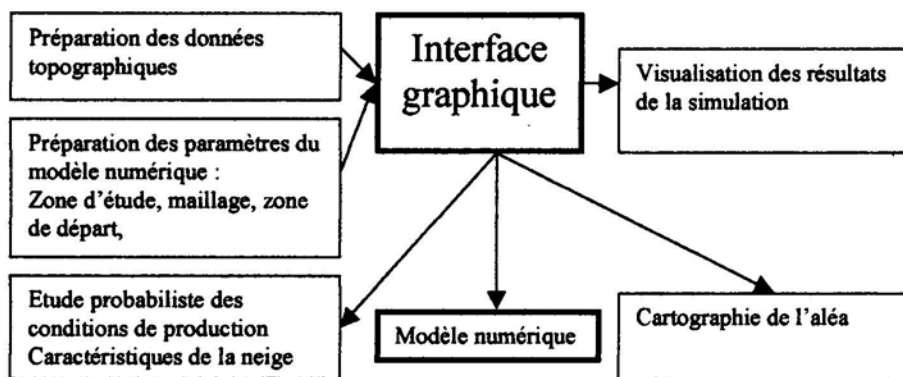
- Conditions initiales: Zone de fracture, épaisseur de fracture, neige disponible dans l'ensemble du couloir ;
- Les paramètres de frottements, la densité etc. ;
- Les paramètres spécifiques à une simulation et qui sont le pas de temps, les temps de sauvegardes intermédiaires, les critères d'arrêt de la simulation, etc.

La saisie des zones de rupture (zone de départ) doit être aidée par l'affichage des pentes, des lignes de niveaux, pour la rendre aisée. Le manteau neigeux doit être stocké et géré sous forme d'une couverture du SIG (GRID ou TIN). Il doit être accessible aux modèles (via le développement d'interfaces spécifiques).

La plupart des modèles numériques sont écrit en langage Fortran et C et ne sont pas forcément accompagné d'interfaces facilitant leur utilisation. Pour intégrer ces modèles dans un environnement commun (un SIRS), il est nécessaire d'écrire une interface spécifique pour chaque modèle. Cette interface doit traduire les données d'entrée venant d'un SIG en données lisibles et aux formats du modèle numérique. Elle doit aussi traduire en format de fichier d'échange lisible par le SIG les résultats du modèle numérique.

6.1 Exemple d'implémentation d'un prototype

Pour montrer la faisabilité de ce que nous avons préconisé, nous avons choisi l'environnement Arc/Info et réalisé un prototype. Le prototype est construit à partir d'une interface graphique qui permet les différentes tâches successives :



Ce système permet d'importer plusieurs formats de données topographiques. Elle permet de créer un TIN pour décrire correctement la topographie, définir les conditions d'utilisations des modèles et tracer les résultats finaux sous forme de cartes.

Ce prototype n'est qu'une illustration des idées proposées dans le cahier des charges. Il ne constitue pas en soit un outil finalisé. Il a par contre été utilisé pour étudier plusieurs couloirs d'avalanches.

7 Proposition de procédure de zonage de l'aléa

Le travail engagé dans ce projet a abordé, de façon exploratoire, une méthode de zonage en trois niveaux : noir, gris et blanc.

Si on note f la fréquence du phénomène et I son intensité et si on note : f_1 la période de retour supérieure à 100 ans, f_2 comprise entre 20 et 100 ans, f_3 comprise entre 5 et 20 ans et f_4 comprise entre 1 et 5 ans et si on note I_1 : la sollicitation statique équivalente < 5 kN/m₂, I_3 comprise entre 5 et 15 kN/m₂, I_4 comprise entre 15 et 30 kN/m₂ et I_5 supérieure à 30 kN/m₂ alors on peut croiser ces informations dans le tableau suivant :

Fréquence				
f_5				
f_4				
f_3				
f_2				
f_1				
	I_1	I_3	I_4	I_5
	Intensité			

Cette procédure n'est qu'exploratoire et est ici présentée à titre démonstratif pour illustrer les capacités du système à gérer ce genre d'informations.

8 Conclusions et perspectives

Une analyse statistique appuyée sur : la probabilité d'occurrence d'une précipitation, la probabilité de déclenchement et l'analyse de la probabilité de passage de l'avalanche en un point donné du couloir permet de faire une représentation en termes d'intensité et de probabilité de l'aléa en chaque point du couloir.

Plusieurs problèmes subsistent :

- Validation par test et confrontation des différents modules aux données existantes,
- Validation de cette démarche d'ensemble par rapport à des méthodes statistiques (Norvège),
- Validation de cette démarche d'ensemble par rapport aux observations contenues dans l'Enquête Permanente sur les Avalanches (limites d'arrêt) sur les couloirs documentés.
- Validation de cette démarche d'ensemble et test sur différentes vallées.

Ce projet a été l'occasion de confronter différentes sources de données et de les combiner pour apporter une information objective sur le niveau de l'aléa. Il a permis de faire travailler ensemble des personnes issues de disciplines et d'horizon divers : Ingénieurs, statisticiens, mécaniciens, météorologues, etc. Il a été l'occasion de poser les bases pour une étude de l'aléa probabilisé pour les avalanches.