



**HAL**  
open science

## Fuzzification de la distance d'arrêt des avalanches dans les Alpes françaises pour l'aide à la décision en ski de randonnée

Fanny Pagnier, Frédéric Pourraz, Gilles Mauris, Didier Coquin, Hervé Verjus

► **To cite this version:**

Fanny Pagnier, Frédéric Pourraz, Gilles Mauris, Didier Coquin, Hervé Verjus. Fuzzification de la distance d'arrêt des avalanches dans les Alpes françaises pour l'aide à la décision en ski de randonnée. LFA 2021 - Rencontres francophones sur la Logique Floue et ses Applications, Oct 2021, Paris, France. pp.77-84. hal-03541353

**HAL Id: hal-03541353**

**<https://univ-smb.hal.science/hal-03541353v1>**

Submitted on 16 Feb 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Fuzzification de la distance d'arrêt des avalanches dans les Alpes françaises pour l'aide à la décision en ski de randonnée

F. Pagnier<sup>1</sup>

F. Pourraz<sup>1</sup>

G. Mauris<sup>1</sup>

D. Coquin<sup>1</sup>

H. Verjus<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LISTIC - Université Savoie Mont Blanc, 5 chemin de Bellevue, Annecy-le-Vieux, 74940 Annecy, France  
{fanny.pagnier, frederic.pourraz, gilles.mauris, didier.coquin, herve.verjus}@univ-smb.fr

## Résumé :

Nous présentons dans ce papier nos travaux réalisés sur l'un des paramètres d'entrée d'un système d'aide à la décision en terrain soumis au risque d'avalanche. En particulier, nous présentons le développement d'un modèle flou permettant d'estimer la distance d'arrêt des avalanches dans les Alpes françaises. Ce modèle, adapté aux massifs alpins français, est développé afin de pallier aux modèles existants, invalides dans ce contexte. Les valeurs obtenues en sortie de ce modèle flou (i.e. les degrés d'appartenance aux ensembles flous décrivant l'aspect sécuritaire ou insécuritaire des distances prises sur le terrain, par les skieurs, par rapport aux pentes avalancheuses) sont ensuite intégrées comme données d'entrée du système global d'aide à la décision combinant un ensemble de paramètres.

## Mots-clés :

Risque d'avalanches, Distance d'arrêt, Pente, Théorie des sous-ensembles flous, Aide à la décision.

## Abstract:

Our work relative to one of the input parameters from a decision support system in avalanche terrains is presented in this paper. We present indeed a fuzzy model we developed to estimate the runout distance of avalanches in the French Alps. This model has been developed to compensate for the lack of models adapted to the French alpine massifs, as existing methods are invalid there. The values given by the model (i.e. membership degrees to the fuzzy sets which describe the safety or unsafety aspects of the distance to avalanche slopes taken by the skiers on the field) are integrated as input parameters in the global decision support system combining a set of parameters.

## Keywords:

Avalanche risk, Runout distance, Slope, Fuzzy set Theory, Decision support

## 1 Introduction

Nous travaillons au développement d'un système d'aide à la décision pour le choix d'itinéraire de ski de randonnée soumis au risque d'avalanche. Ce système s'appuie sur la démarche CRISTAL [4]. Elle est basée sur 6 paramètres qui doivent être pris en compte pour l'estimation du risque d'avalanche sur le terrain, tous pouvant être décrits de manière floue.

Nos travaux se concentrent sur la définition et la fuzzification de la distance d'arrêt des avalanches, liée au paramètre inclinaison des pentes. La pente joue en effet un rôle prépondérant dans le déclenchement des avalanches. Un consensus est d'ailleurs établi sur le fait qu'une inclinaison minimale de 30° est requise pour permettre leur déclenchement [10] [8].

Un skieur évoluant en terrain soumis au risque d'avalanche est donc menacé par les pentes qu'il fréquente, mais aussi par les pentes qui dominent son itinéraire si celles-ci dépassent l'inclinaison de 30°. Il devient alors nécessaire de considérer les pentes qui dominent l'itinéraire et surtout de savoir si une avalanche s'y déclenchant serait susceptible d'atteindre le skieur ou non. Dans ce cas, il s'agit d'évaluer la distance maximale affectée par l'écoulement d'une avalanche (nous parlerons de *distance d'arrêt des avalanches*), afin de mettre en œuvre sur le terrain une distance de sécurité supérieure à cette distance d'arrêt.

Les modèles statistiques les plus couramment utilisés pour estimer la distance d'arrêt maximale des avalanches [5] [7] ne sont pas adaptés pour les Alpes [1]. Pour cette raison, nous avons développé un modèle exprimant cette distance d'arrêt maximale théorique qui soit adapté aux massifs alpins français.

L'expression d'une valeur seuil unique pour définir la distance d'arrêt des avalanches est trop précise pour traduire la réalité physique qu'elle représente. Nous avons alors décrit cette distance d'arrêt à travers une fuzzification, modélisant une plage d'incertitude sur cette distance. Du point de vue du skieur, cette distance d'arrêt

correspond à une distance minimale de sécurité. Comme nous l'expliquerons par la suite, nous avons choisi de faire appel à une fuzzification (basée sur la logique floue [11] [2] [3]) pour estimer si la position d'un skieur est sécuritaire ou non lorsqu'il est dominé par des pentes susceptibles de produire des avalanches.

La section 2 présente les données utilisées ainsi que le prétraitement nécessaire à leur exploitation. La section 3 décrit ensuite la démarche mise en œuvre pour le développement du modèle ainsi que la fuzzification de la distance d'arrêt des avalanches. La section 4 propose une validation du modèle flou sur la base d'une mise en application sur des données récentes non prises en compte pour son développement. Enfin, la section 5 présente le système global d'aide à la décision dont le modèle flou dynamique relatif à la distance d'arrêt des avalanches constitue l'un des paramètres d'entrée.

## 2 Données et prétraitements

Nous avons étudié 159 avalanches extraites de la base de données de [data-avalanche.org](http://www.data-avalanche.org)<sup>1</sup>. Ces avalanches ont été observées sur l'ensemble des massifs alpins français et ont toutes la particularité d'avoir fait l'objet d'un détournage précis et géo-référencé de leur emprise totale. Le terme *enveloppe* sera employé dans la suite de cette étude pour faire référence à cette emprise.

Ces avalanches résultent de la période 1999-2021. Les avalanches observées entre 1999 et le printemps 2019 (soit 149 enveloppes sur les 159 disponibles), ont été utilisées pour développer la méthode et permettre la fuzzification de la distance d'arrêt des avalanches dans les Alpes françaises (section 3). Les avalanches les plus récentes (qui correspondent aux années 2020 et 2021) ont été exploitées pour permettre une validation du modèle développé à travers une mise en application (section 4).

À partir de ces enveloppes d'avalanches, nous

1. <http://www.data-avalanche.org/> Association pour l'amélioration et le partage de connaissances sur les avalanches.

avons extrait 8 métriques différentes (Figure 1) :

- **alpha**, l'angle entre l'horizontale et la droite passant par l'extrême limite du dépôt et le point de rupture le plus haut ;
- **gamma**, l'angle entre l'horizontale et la droite passant par l'extrême limite du dépôt et le point d'inflexion à 30° le plus bas ;
- **D**, le dénivelé de la pente supérieure au point d'inflexion à 30° le plus bas ;
- **D'**, le dénivelé de la pente inférieure au point d'inflexion à 30° le plus bas ;
- **d**, la distance plane entre le plus haut point de rupture et le point d'inflexion à 30° le plus bas ;
- **d'**, la distance plane entre le point d'inflexion à 30° le plus bas et l'extrême limite du dépôt ;
- **D+D'**, le dénivelé total de l'avalanche ;
- **d+d'**, la distance plane totale de l'avalanche.

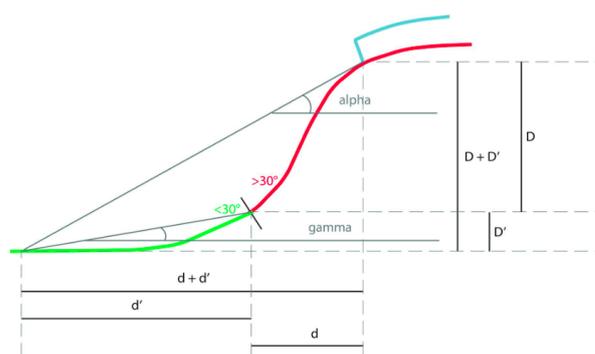


Figure 1 – Représentation schématique des différentes métriques calculées

Avant d'être en mesure d'extraire ces paramètres, une avalanche étant souvent sinueuse et pouvant produire plusieurs branches lors de son écoulement, nous avons mis en œuvre un prétraitement sur l'ensemble des enveloppes. Ce prétraitement permet d'extraire le tracé central d'une avalanche à partir de son enveloppe ainsi que le profil altimétrique de ce tracé (Figure 2). Ce principe a été automatisé de façon à être mis en œuvre sur chacune des avalanches.

À partir de ces données, nous avons pu déterminer la position du point d'inflexion à 30° le plus bas, que nous appelons *point limite* (Figure 2). En parcourant le tracé de l'avalanche de l'aval vers l'amont, ce point correspond au premier point de passage entre une pente infé-

rière et une pente supérieure à  $30^\circ$ . Rappelons qu'une avalanche se déclenche dans une pente supérieure à  $30^\circ$  et qu'en dessous de cette valeur, toute avalanche décélère. Nous pouvons donc considérer que ce point limite existe pour chaque occurrence d'avalanche. À ce stade, nous avons enfin pu extraire chacune des métriques présentées précédemment (Figure 1).

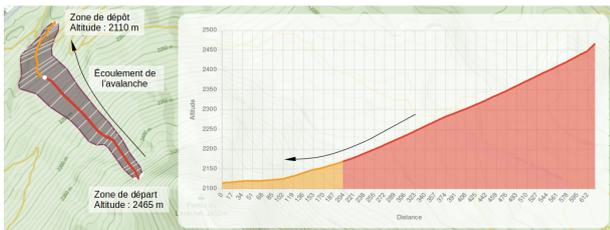


Figure 2 – Extraction du tracé central et du point limite (Tracé orange : portion de pente en dessous du point limite; Tracé rouge : portion de pente au-dessus du point limite)

### 3 Estimation et fuzzification de la distance d'arrêt

#### 3.1 Relation entre les métriques étudiées

Nous avons comparé deux à deux chacune des métriques et avons trouvé une relation linéaire (violet, Figure 3) entre  $D$  (i.e. le dénivelé de la pente supérieure au point limite) et  $d+d'$  (i.e. la distance plane totale de l'avalanche). A cette relation linéaire est associé le coefficient de corrélation suivant :  $R = 0,96$ .

À l'issue de la régression, deux points restent fortement éloignés de la droite de régression. Ils correspondent à :

1. Une avalanche qui s'est déclenchée dans une pente supérieure à  $30^\circ$  et s'est propagée sur une longue distance dans des pentes juste inférieures à  $30^\circ$  (d'où  $d+d'$  très grand pour ce  $D$ );
2. Une avalanche qui s'est déclenchée et qui s'est propagée sur une longue distance dans une pente d'inclinaison juste supérieure à  $30^\circ$  (d'où  $d$  grand donc  $d+d'$  grand comparé aux autres avalanches ayant le même  $D$  mais associées à des pentes nettement plus raides que  $30^\circ$ ).

#### 3.2 Fuzzification de la distance d'arrêt des avalanches

L'objectif étant d'estimer la distance pour laquelle le skieur a une position sécuritaire (i.e. supérieure à la distance d'arrêt), on ne peut pas définir cette distance sur la seule base de cette unique régression. De nombreuses avalanches ont en effet une position supérieure à la droite de régression obtenue (violet, Figure 3); dans ce cas, même en s'éloignant d'une distance supérieure à la distance d'arrêt exprimée (i.e. l'ordonnée du point sur la droite pour la bonne valeur de  $D$ ), le skieur pourrait être affecté par certaines avalanches. Par conséquent et pour prendre en compte un maximum de cas, nous avons calculé différentes régressions linéaires de manière itérative (Figure 3). Dans le cadre de ces travaux, nous avons en effet choisi de conserver un modèle simple, facilement explicable aux professionnels de la montagne.

#### Principe de la régression calculée de manière itérative

1<sup>ère</sup> itération : calcul de  $\mathcal{D}_1$  avec tous les points, soit avec les 149 observations, d'où l'équation :  $Y_1 = a_1X_1 + b_1$ , avec  $a_1 = 1,87$  et  $b_1 = 21,98$ . Donc un point de la droite  $\mathcal{D}_1$  vérifie :

$$y_{1,i} = a_1x_{1,i} + b_1.$$

2<sup>ème</sup> itération : calcul de  $\mathcal{D}_2$  avec les points des observations  $M_i = (x_i, y_i)$  situés au-dessus de  $\mathcal{D}_1$ , i.e. les points tels que  $y_i > y_{1,i}$ , avec  $y_{1,i}$  l'ordonnée du point d'abscisse  $x_i$  sur  $\mathcal{D}_1$ .

Nous obtenons alors la droite de régression :  $Y_2 = a_2X_2 + b_2$ , avec  $a_2 = 2,15$  et  $b_2 = 61,50$ .

3<sup>ème</sup> itération : calcul de  $\mathcal{D}_3$  avec les points des observations  $M_i = (x_i, y_i)$  situés au-dessus de  $\mathcal{D}_2$ , i.e. les points tels que  $y_i > y_{2,i}$ , avec  $y_{2,i}$  l'ordonnée du point d'abscisse  $x_i$  sur  $\mathcal{D}_2$ .

Nous obtenons alors la droite de régression :  $Y_3 = a_3X_3 + b_3$ , avec  $a_3 = 2,26$  et  $b_3 = 143,15$ .

Ce principe permet d'obtenir, pour chaque itération, une droite aux valeurs plus élevées que la précédente. Cette droite est alors plus adaptée aux cas d'avalanches pour lesquels la précédente ne correspondait pas à la limite d'une position sécuritaire.

Nous avons jugé que trois itérations permettent d’englober la majeure partie des cas, sans pour autant devenir trop pessimiste (ce qui serait le cas en englobant l’ensemble des points). Ainsi, seuls 7 cas d’avalanche (sur 149, soit moins de 5 % des données exploitées) ne sont pas englobés par les trois droites de régression.

À partir de ces différentes régressions, nous pouvons enfin estimer si une avalanche risque d’atteindre le skieur ou non : il suffit en effet de connaître le dénivelé de la pente d’inclinaison supérieure à 30° qui surplombe le skieur (D) pour estimer la distance d’arrêt des avalanches (d+d’). La distance minimale de sécurité à adopter par rapport au sommet de cette même pente correspond donc à une distance supérieure à la distance d’arrêt estimée.

Sur la Figure 3, trois cas apparaissent du fait des trois itérations successives :

- Dans la zone violette, le risque d’être emporté par l’avalanche est fort. Le skieur se trouve dans la zone d’écoulement d’une potentielle avalanche.
- Dans la zone blanche, sauf dans des cas extrêmes liés à la configuration du terrain, le risque d’être emporté par l’avalanche est faible. Le skieur se trouve au delà de la distance d’arrêt d’une potentielle avalanche.
- Dans les zones jaune et orange, une incertitude subsiste et le risque d’être emporté par l’avalanche est réel, tout en sachant que plus on s’approche de la bordure haute de la zone jaune et plus ce risque diminue. Le skieur se trouve dans une zone intermédiaire et la ligne jaune correspond donc à la distance minimale de sécurité.

Bien que d’autres méthodes existent pour inférer des fonctions d’appartenance à partir de données [6] [9], nous avons choisi de fuzzifier la distance d’arrêt des avalanches à partir de ces trois cas. Ainsi, pour une valeur de D donnée, trois valeurs de d+d’ sont calculées : la valeur des ordonnées des points obtenus sur les trois droites de régressions (violette, orange et jaune). La distance d’arrêt est alors exprimée à travers une fuzzification dynamique, évoluant en fonction de la valeur de D (Figure 4).

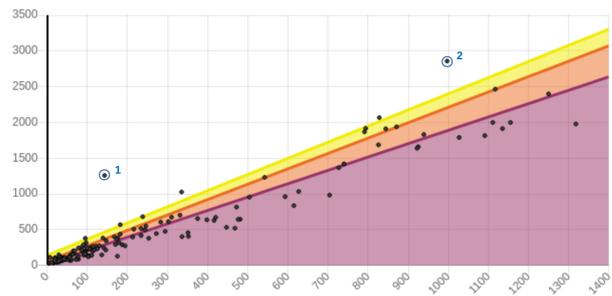


Figure 3 – Relation linéaire entre D (abscisse) et d+d’ (ordonnée) en mètres : 1<sup>ère</sup> droite de régression (violette, avec R=0,96), régressions itératives (orange, jaune) et zones affectées par l’écoulement

### Formalisme de la fuzzification de la distance d’arrêt des avalanches.

Soit une valeur de D donnée et d+d’<sub>v</sub>, d+d’<sub>o</sub> et d+d’<sub>j</sub> les valeurs de d+d’ obtenues respectivement sur les droites de régression violette, orange et jaune à l’abscisse D.

Alors les trois fonctions d’appartenance *unsafe*, *intermediate* et *safe* sont des fonctions continues, linéaires et strictement croissantes ou décroissantes sur les intervalles [d + d’<sub>v</sub>, d + d’<sub>o</sub>] et [d + d’<sub>o</sub>, d + d’<sub>j</sub>] et sont définies par les principales valeurs suivantes :

$$unsafe(d + d') = \begin{cases} 1 & \text{si } d + d' \in [0, d + d'_v] \\ 0 & \text{si } d + d' \geq d + d'_o \end{cases}$$

$$intermediate(d + d') = \begin{cases} 0 & \text{si } d + d' \leq d + d'_v \\ 1 & \text{si } d + d' = d + d'_o \\ 0 & \text{si } d + d' \geq d + d'_j \end{cases}$$

$$safe(d + d') = \begin{cases} 0 & \text{si } d + d' \leq d + d'_o \\ 1 & \text{si } d + d' \geq d + d'_j \end{cases}$$

Cette fuzzification exprime le fait qu’une distance de sécurité soit plus ou moins suffisante, connaissant D. Cette évaluation se fait grâce aux trois fonctions d’appartenance *safe* (en vert), *intermediate* (en orange) et *unsafe* (en violet). Pour un D donné, en fonction de la valeur de la distance envisagée par le skieur (supérieure ou inférieure aux deux valeurs de d+d’ données par les droites violette et jaune (correspondant aux 1<sup>ère</sup> et 3<sup>ème</sup> itérations), ou encore, comprise entre ces deux valeurs), la position

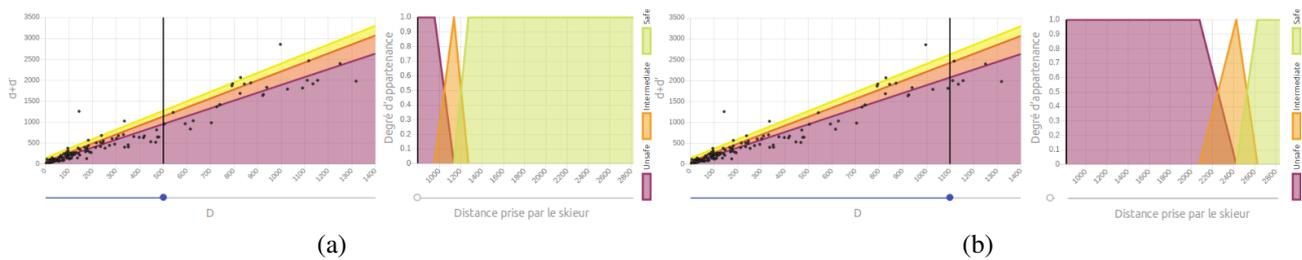


Figure 4 – Illustration du système flou dynamique

sera respectivement estimée comme 100% sécuritaire (zone verte), 100% insécuritaire (zone violette) ou intermédiaire (à la fois dans la zone orange et l'une des zones verte ou violette); elle sera 100% intermédiaire dans le seul cas où la distance prise par le skieur correspondra à la valeur de  $d+d'$  donnée par la droite orange (correspondant à la 2<sup>ème</sup> itération). Prenons un exemple : dans le cas présenté en Figure 4a, le skieur est dominé par une pente d'inclinaison supérieure à 30° de 500 mètres de dénivelé. S'il s'éloigne d'une distance planimétrique de 1000 mètres, il se trouvera alors dans une situation intermédiaire caractérisée par un degré d'appartenance de 0,75 au sous ensemble flou *unsafe* et de 0,25 au sous ensemble flou *intermediate*. S'il augmente sa distance à 1250 mètres, sa distance deviendra plus sécuritaire et les degrés d'appartenance seront alors de 0,16 et 0,84 respectivement pour les sous-ensembles flous *intermediate* et *safe*.

#### 4 Validation du modèle

Une première étude (basée sur 149 enveloppes d'avalanche) a permis d'obtenir un modèle adapté aux massifs alpins français fuzzifiant la distance d'arrêt des avalanches (section 3). Dans cette section, nous souhaitons présenter une validation des valeurs obtenues grâce à une mise en application sur les 10 avalanches restantes dans le jeu de données, avalanches observées en 2020 et 2021.

En mettant en œuvre le modèle établi, nous pouvons estimer si la fuzzification de la distance d'arrêt des avalanches dans les massifs alpins français est satisfaisante ou non (en comparant

	Observations		Estimations		
	D	d+d'	Violet d+d'	Orange d+d'	Jaune d+d'
Avalanche 1	99	157,04	206,81	271,56	366,57
Avalanche 2	662	1460,08	1257,86	1426,12	1637,11
Avalanche 3	812	1238,09	1537,89	1733,73	1975,62
Avalanche 4	10	85,78	40,65	89,04	165,72
Avalanche 5	174	311,94	346,82	425,36	535,82
Avalanche 6	507	1055,49	968,49	1108,25	1287,32
Avalanche 7	22	127,02	63,06	113,65	192,80
Avalanche 8	201	367,68	397,23	480,73	596,76
Avalanche 9	233	564,32	456,97	546,35	668,97
Avalanche 10	71	128,04	154,53	214,14	303,38

Distance (en m) non sécuritaire (inférieure à la distance observée)  
Distance (en m) sécuritaire (supérieure à la distance observée)

Figure 5 – Mise en application du modèle établi sur 10 nouvelles enveloppes d'avalanches

les valeurs estimées aux valeurs observées). De plus, nous pouvons aussi montrer l'apport de la fuzzification par rapport à la description nette de cette distance d'arrêt, obtenue par une seule régression linéaire.

**Résultats.** Le tableau (Figure 5) donne les résultats de cette mise en application et indique dans laquelle des trois zones estimées par le modèle flou (1 : zone violette, associée à la fonction d'appartenance *unsafe*; 2 : zones orange et jaune, associées aux fonctions d'appartenance *intermediate* et *unsafe* ou *intermediate* et *safe*; 3 : zone blanche, associée à la fonction d'appartenance *safe*) se trouvent les avalanches.

- Dans 5 cas sur 10, la distance d'arrêt estimée par la droite violette est sous-estimée et ne correspond pas à une distance minimale de sécurité (distance estimée plus petite que distance observée). Seules 5 avalanches sur 10 sont en effet situées dans la zone violette, zone d'écoulement d'une potentielle avalanche. Ainsi, la description nette est satisfaisante dans seulement 50% des cas. Cela renforce l'intérêt de la fuzzification, qui rend les choses plus souples.

- À l'inverse, les distances estimées par la droite

jaune présentent une certaine marge et sont, pour ces 10 cas, toujours supérieures aux distances observées. Aucune avalanche n'est en effet située dans la zone blanche (zone correspondant aux distances de sécurité, supérieures à la distance d'arrêt maximale des avalanches estimée par le modèle).

- Les 5 avalanches restantes sont situées dans la zone intermédiaire décrite par le système flou : zones orange et jaune qui correspondent à la zone couverte par la fonction d'appartenance *intermediate*. Dans cette zone, les degrés d'appartenance à *intermediate* et *unsafe* ou *intermediate* et *safe* dépendent de la distance à la pente avalancheuse prise par le skieur sur le terrain, comme illustré dans l'exemple ci-après.

Ainsi, la droite violette (correspondant au modèle net et à la borne inférieure du modèle flou dynamique) est insuffisante dans la plupart des cas. La droite jaune (correspondant à la borne supérieure du modèle flou dynamique) est satisfaisante, exprimant une distance d'arrêt des avalanches au-delà de laquelle la distance est effectivement sécuritaire. La droite orange permet quant à elle d'exprimer une situation intermédiaire. La fuzzification permet ainsi un passage progressif entre une distance pouvant être insuffisante pour définir la distance d'arrêt des avalanches (dans 1 cas sur 2 ici), marquant une zone d'insécurité (zone violette, associée à la fonction d'appartenance *unsafe*), et une distance sécuritaire (associée à la distance d'arrêt maximale des avalanches), marquant une zone de sécurité (zone verte, associée à la fonction d'appartenance *safe*). Par exemple, dans le cas présenté en Figure 4b, le skieur est dominé par une pente d'inclinaison supérieure à 30° de 1100 mètres de dénivelé; s'il s'éloigne d'une distance planimétrique inférieure à 2075 mètres, il se trouvera dans une situation insécuritaire (degré d'appartenance valant 1 pour le sous-ensemble flou *unsafe*); à l'inverse, s'il s'éloigne d'une distance planimétrique supérieure à 2625 mètres, il se trouvera dans une situation sécuritaire (degré d'appartenance valant 1 pour le sous-ensemble flou *safe*).

Cependant, les valeurs données par la droite

jaune offrent une marge qui peut être jugée comme trop importante (trop sécuritaire) et qui peut conduire à trop restreindre les possibilités de pratique; une marge trop importante peut aussi être impossible à mettre en œuvre selon la configuration du terrain (du fait de la complexité du terrain, il peut être impossible dans certains cas de prendre de telles distances par rapport à une section de pente avalancheuse). Le modèle flou permet de gérer toutes distances intermédiaires et ainsi d'intégrer dans un système d'aide à la décision plus global une estimation du degré de sécurité (ou d'insécurité) associé. Pour poursuivre l'exemple donné ci-avant, dans le cas où le skieur s'éloigne d'une distance planimétrique comprise entre 2075 et 2625 mètres, il se trouve dans une situation intermédiaire (caractérisée par des degrés d'appartenance non nuls pour le sous-ensemble flou *intermediate*). En particulier, s'il s'éloigne de 2300 mètres, ce sont les deux sous-ensembles flous *unsafe* et *intermediate* qui seront concernés (avec des degrés d'appartenance valant respectivement 0,36 et 0,64); s'il s'éloigne de 2600 mètres, ce sont les deux sous-ensembles flous *intermediate* et *safe* qui seront concernés (avec des degrés d'appartenance valant respectivement 0,125 et 0,875). Les valeurs d'appartenance à chacun des sous-ensembles flous constituent ensuite des données d'entrée du système global d'aide à la décision qui fait l'objet de la section suivante.

## 5 Système flou d'aide à la décision

Nous travaillons actuellement au développement d'un système d'aide à la décision permettant d'adopter, sur le terrain, un mode de vigilance adapté au risque d'avalanche estimé. Ce système permettra de passer de 6 paramètres, à prendre en compte pour l'estimation du risque d'avalanche sur le terrain, à l'un des 4 modes de vigilance défini dans la démarche CRISTAL [4]. L'objectif est donc d'adopter le comportement le plus adapté possible à la situation. Ces 6 paramètres sont cependant définis avec un niveau d'abstraction élevé et peuvent ainsi être

décomposés en sous-paramètres permettant une évaluation plus fine de la situation. De la même manière, tous peuvent être décrit de façon floue.

Les 6 paramètres exploités sont : 1) *indice de risque du Bulletin d'Estimation du Risque d'Avalanche (BERA)*, 2) *inclinaison des pentes*, 3) *avalanches récentes observées*, 4) *élévation de température et fonte*, 5) *surcharges nouvelles* et 6) *couche fragile enfouie*.

Comme évoqué, les travaux présentés dans ce papier se concentrent sur le paramètre relatif à l'inclinaison des pentes. Celui-ci peut être défini par les sous-paramètres suivants : *inclinaison des pentes fréquentées par le skieur*, *inclinaison des pentes qui dominent l'itinéraire du skieur* et, si ces dernières sont supérieures à  $30^\circ$ , *l'avalanche peut-elle atteindre le skieur ?*

Bien que la valeur seuil de  $30^\circ$  fasse consensus, une imprécision de mesure subsiste lors de l'estimation de l'inclinaison des pentes. La fuzzification des deux premiers sous-paramètres permet de la prendre en compte. Le troisième sous-paramètre (*l'avalanche peut-elle atteindre le skieur ?*) est quant à lui évalué par le modèle flou dynamique défini dans ce papier (Figure 4).

Dans son ensemble (Figure 6), le système d'aide à la décision en cours de développement prend en entrée les 6 paramètres évoqués grâce à la fuzzification de chacun des sous-paramètres qui les constituent. Il permet ensuite, en appliquant les blocs FUZZIFICATION et INFÉRENCE FLOUE (réalisée à partir d'une base de règles) d'obtenir en sortie une valeur chiffrée d'appartenance à chacun des 4 modes de vigilances possibles : *Détendu*, *Méfiant*, *Alerté* et *Hazardeux* (Figure 6). À un mode de vigilance donné correspond un comportement à adopter sur le terrain : en mode *Méfiant*, par exemple, on cherchera à éviter le danger, en mode *Alerté*, à réduire le risque. Grâce aux différents degrés d'appartenance obtenus en sortie du système, par exemple 0,8 pour le mode *Méfiant* et 0,2 pour le mode *Alerté*, le skieur sera davantage sur ses gardes qu'un skieur uniquement dans le mode *Méfiant*. Il prendra donc quelques précautions supplémentaires pour envisager de réduire

le risque évitant ainsi tout effet de surprise.

Le modèle d'estimation de la distance d'arrêt des avalanches développé correspond donc à la fuzzification du sous-paramètre *l'avalanche peut-elle atteindre le skieur ?*, paramètre pris en compte chaque fois que les pentes qui surplombent l'itinéraire sont d'inclinaison supérieure à  $30^\circ$ . Ainsi, les valeurs obtenues (i.e. les degrés d'appartenance aux sous-ensembles *safe*, *intermediate* et *unsafe*) sont alors des entrées utilisées dans les règles floues.

## 6 Conclusion

Cette étude a permis le développement d'un modèle flou exprimant la distance d'arrêt des avalanches dans les Alpes françaises. Ce modèle, inspiré des modèles statistiques existants, est issu de cas concrets d'avalanches observées sur les massifs alpins français. Il résulte de la corrélation entre le dénivelé de pente à plus de  $30^\circ$  parcourue par l'avalanche et la distance plane totale associée à la même avalanche.

Ce modèle a été établi sur la base de 149 avalanches et sa mise en application sur 10 enveloppes plus récentes démontre sa validité. Si l'estimation nette de la distance d'arrêt est insuffisante dans un cas sur deux, la fuzzification permet une estimation de la distance d'arrêt grâce à un système progressif.

Cependant, ce modèle est basé sur des statistiques et correspond donc à un cas nominal. Il peut alors montrer ses limites sur quelques cas isolés (liés essentiellement à la configuration du terrain, comme expliqué précédemment). Nous avons vu en effet que quelques cas d'avalanches particuliers sortent du modèle. Pour intégrer ces cas plus extrêmes, liés à la configuration du terrain, le modèle devrait inclure une analyse naturaliste propre à chaque cas. Cette dernière serait basée sur la topographie générale du couloir d'avalanche et non plus seulement sur sa trace centrale. Ceci permettrait de prendre en compte à la fois la largeur de l'écoulement et les pentes latérales susceptibles d'alimenter le flux responsable du dépôt et, à l'inverse, les cas d'ava-

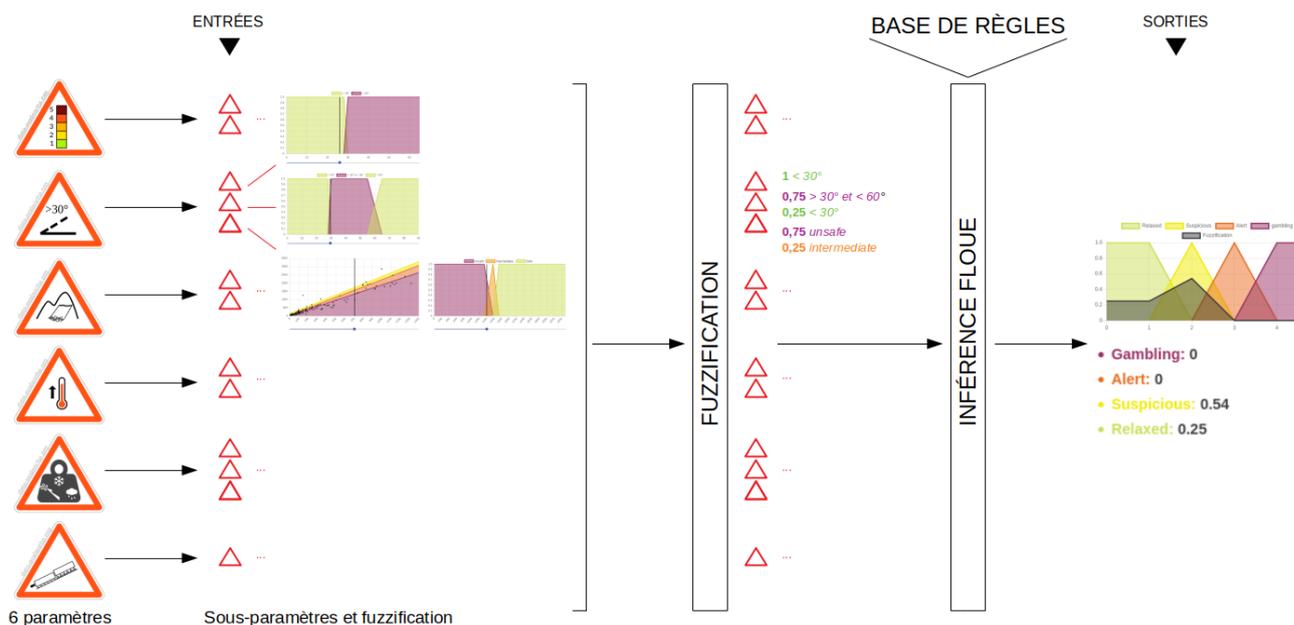


Figure 6 – Vue d'ensemble du système global, schéma de principe

lanches se divisant en deux branches, réduisant ainsi la distance de l'écoulement. Cela peut faire l'objet de perspectives à ce travail ; notre approche ne couvre en effet pas l'ensemble de la réalité naturelle du phénomène étudié, plus variable et complexe que le cas général.

Pour finir, le modèle flou dynamique relatif à la distance d'arrêt des avalanches (section 3) est une brique de base d'un système plus complexe. Il constitue en effet l'une des entrées d'un système flou d'aide à la décision, dont le développement fait l'objet de travaux en cours.

#### Remerciements :

Le projet CIME est soutenu par le programme européen de coopération transfrontalière Interreg France-Suisse 2014-2020 et a bénéficié à ce titre d'une subvention européenne (Fonds Européen de Développement Régional) couvrant 60% du coût total français.

Nous remercions également le nivologue Alain Duclos, président de l'association data-avalanche.org, pour nous avoir donné accès aux enveloppes d'avalanches géoréférencées constituant notre jeu de données.

#### Références

- [1] Adjel G., 1995. Méthodes statistiques pour la détermination de la distance d'arrêt maximale des avalanches. *La Houille Blanche*, n°7 (Octobre 1995), pp. 100-104.
- [2] Bouchon-Meunier, B., Lesot, M.-J., Marsala, C. : Modeling and Management of Subjective Information in a Fuzzy Setting. *Int. J. Gen. Syst.* 42, 2013, pp.3-19
- [3] Dubois D. and H.Prade. The legacy of 50 years of fuzzy sets : A discussion. *Fuzzy Sets and Systems*, Elsevier, 2015, 281, pp.21-31
- [4] Duclos, A., 2020, Démarche CRISTAL - <https://prezi.com/jidae0cybmhz/vigilance-encadree-par-6-parametres/>
- [5] Lied, K., Bakkehøi, K., 1980. Empirical Calculations of Snow-Avalanche Run-out Distance Based on Topographic Parameters. *Journal of Glaciology* 26, 165-177. <https://doi.org/10.3189/S0022143000010704>
- [6] Marsala, C. (1995, October). Fuzzy partition inference over a set of numerical values. In *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems* (pp. 1512-1517).
- [7] McClung, D.M., Mears, A.I., 1991. Extreme value prediction of snow avalanche runout. *Cold Regions Science and Technology* 19, 163-175. [https://doi.org/10.1016/0165-232X\(91\)90006-3](https://doi.org/10.1016/0165-232X(91)90006-3)
- [8] Schweizer J., Jamieson J. B., Schneebeli M., 2003. Snow avalanche formation. *Reviews of Geophysics*, Volume 41, Issue 4.
- [9] Smits, G., Pivert, O., Lesot, M. J. (2017, June). Vocabulary elicitation for informative descriptions of classes. In *2017 Joint 17th World Congress of International Fuzzy Systems Association and 9th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (IFSA-SCIS)* (pp. 1-8). IEEE.
- [10] Vontobel I., Harvey S., Purves R.S., 2013. Terrain analysis of skier-triggered avalanche starting zones. *Proc. ISSW, Grenoble - Chamonix Mont-Blanc, France*.
- [11] Zadeh L.A., 1965. Fuzzy sets. *Information and control*, 8, pp338-353.