



**HAL**  
open science

# Méthode d'aide à la décision pour caractériser la vigilance requise en terrain avalancheux

Fanny Pagnier

► **To cite this version:**

Fanny Pagnier. Méthode d'aide à la décision pour caractériser la vigilance requise en terrain avalancheux. Recherche d'information [cs.IR]. Université Savoie Mont Blanc, 2023. Français. NNT : 2023CHAMA019 . tel-04499936

**HAL Id: tel-04499936**

**<https://theses.hal.science/tel-04499936>**

Submitted on 11 Mar 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.

## THÈSE

Pour obtenir le grade de

## DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC

Spécialité : **STIC Traitement de l'Information**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

**Fanny PAGNIER**

Thèse dirigée par **Didier COQUIN**  
et co-encadrée par **Frédéric POURRAZ** et **Hervé VERJUS**

préparée au sein du **Laboratoire LISTIC**  
dans **l'École Doctorale Sciences Ingénierie Environnement**

## Méthode d'aide à la décision pour caractériser la vigilance requise en terrain avalancheux

Thèse soutenue publiquement le **19 juin 2023**,  
devant le jury composé de :

**Monsieur Jacky MONTMAIN**

Professeur, IMT Mines Alès, Président

**Madame Marie-Jeanne LESOT**

Maître de conférence HDR, LIP6 Sorbonne Université, Paris, Rapportrice

**Madame Mireille BATTON-HUBERT**

Professeur, École des Mines de Saint-Étienne, Rapportrice

**Monsieur Frédéric POURRAZ**

Maître de conférence, LISTIC Université Savoie Mont Blanc, Annecy, Co-Encadrant de thèse

**Monsieur Hervé VERJUS**

Maître de conférence, LISTIC Université Savoie Mont Blanc, Co-Encadrant de thèse

**Monsieur Didier COQUIN**

Professeur, LISTIC Université Savoie Mont Blanc, Annecy, Directeur de thèse



---

## Préambule

Au-delà des six membres constituant le jury, mentionnés en page de couverture du présent document, nous souhaitons souligner ici les rôles joués par Gilles Mauris, Jean-Marc Tacnet et Alain Duclos, au cours du déroulement de cette thèse. Ces deux derniers ont répondu présents lors de la soutenance pour enrichir encore les discussions et échanges, Gilles Mauris étant quant à lui excusé pour des raisons de santé.

Gilles MAURIS (Maître de conférence, LISTIC Université Savoie Mont Blanc, Annecy) a contribué au co-encadrement de la thèse.

Jean-Marc TACNET (Docteur, Ingénieur en chef des Ponts, Eaux et Forêts à l'INRAE) a constitué, aux côtés de Jacky Montmain, le comité de suivi de thèse, pour veiller à mi-thèse au bon déroulement des travaux et discuter ensemble des directions préférentielles à fouiller ensuite.

Alain DUCLOS (Docteur, Guide de haute montagne, Nivologue et expert en avalanche, ALÉA SARL, Fondateur et président de l'association data-avalanche) a partagé avec nous ses connaissances expertes à travers une étroite collaboration.

---



---

*À mes compagnons de cordée,  
au sens propre comme au figuré.*

---



## Remerciements

Je souhaite adresser mes remerciements,

À Frédéric Pourraz sans qui le projet CIME, mettant la science au service des sports de montagne, n'aurait certainement jamais vu le jour ; pour son important travail de développement d'outils logiciels (application et développements web) sur lesquels ont pu reposer le recueil d'informations et les travaux qui s'en sont suivis ; pour son encadrement et les nombreux temps d'échanges et de discussions qui ont fait évoluer mes travaux.

À mon directeur de thèse, Didier Coquin, ainsi qu'à Hervé Verjus et Gilles Mauris, pour leur encadrement, leur implication envers mes travaux et leurs précieux conseils.

À l'ensemble des membres du projet Interreg CIME pour leur intérêt porté au sujet et en particulier à Jean-Christophe Loubier qui m'a mis sur la piste de certaines méthodes exploitées dans nos développements.

À l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail, bien sûr à Jacky Montmain, de m'avoir fait l'honneur d'être président de cette thèse et à Marie-Jeanne Lesot et Mireille Batton-Hubert pour leurs lectures détaillées de ce manuscrit.

À Jean-Marc Tacnet et Jacky Montmain, en tant que membres du comité de suivi de thèse, pour avoir accepté, à mi-thèse, d'évaluer les premiers développements réalisés et discuter ensemble des pistes à venir.

À Alain Duclos pour nos nombreuses discussions toujours très riches, passionnées et passionnantes, qui ont permis d'ancrer véritablement ces travaux dans le concret et qui ont su alimenter chaque fois ma motivation à poursuivre.

À Paul Bonhomme, aussi, qui a su nous partager son expérience du ski de pente raide pour enrichir nos travaux de sa pratique du terrain.

À l'ensemble des collègues, aux doctorants en particulier, mais aussi aux permanents du laboratoire. Sans oublier les autres, je tiens ici à citer les noms de certains d'entre eux, membres actuels ou passés, pour leur soutien particulier, leur aide à la résolution de problèmes techniques ou encore pour leur contribution à la bonne ambiance au sein du laboratoire et les bons moments passés ensemble : Étienne, Alex, Melissa, Emna, Laurane, Blandine, Ammar, Francesco et Hermann.

Aux amis et à la famille, que je ne citerai qu'en ces termes généraux, mais dont chacun, individuellement, saura se reconnaître pour le rôle qu'il a joué dans la réalisation de mon projet de thèse et saura à quel point je l'en remercie.

S'il m'est bien sûr difficile ici de remercier l'ensemble des personnes qui m'ont apporté leur aide pour me permettre de mener à bien cette aventure qu'est la thèse de doctorat, je souhaite surtout, pour reprendre les remerciements précédents et en compléter la liste, dire un grand MERCI à mes *compagnons de cordée*, au sens propre comme au figuré, qui m'ont épaulée au cours de ces dernières années et sans qui rien n'aurait été possible.

Merci à vous.



## Résumé

La pratique des sports de montagne est soumise au risque d'avalanche. En France, les avalanches provoquent en effet une trentaine de décès chaque années parmi les pratiquants de ski de randonnée, ski hors piste et alpinisme. Dans ce contexte, l'intention de ces travaux est de contribuer à l'amélioration de l'aide à la décision face au risque d'avalanche afin de réduire au maximum le nombre d'accidents et d'incidents qui se produisent chaque année. Pour cela, nous explicitons et tentons de répondre aux différents besoins utiles à l'amélioration des méthodes d'aide à la décision existantes.

Les travaux de recherche entrepris portent donc plus spécifiquement sur les motivations suivantes :

- identifier, formaliser et évaluer les informations à prendre en considération dans l'estimation de la situation avalancheuse en cours ;
- déterminer un résultat final caractérisant la vigilance requise par le pratiquant face à la situation avalancheuse locale.

Ainsi, dans le but d'aider les professionnels de la montagne dans leurs prises de décisions quotidiennes, notre objectif principal est de prendre en compte des informations hétérogènes et multi-sources, de les combiner et de communiquer un niveau de vigilance sur lequel l'utilisateur pourra conduire son analyse et prendre sa décision. Ces travaux mettent en particulier en œuvre une méthode de fusion d'informations afin d'agréger de multiples critères hétérogènes, entre autres issus d'observations de terrain. Ce niveau de vigilance à adopter localement, tout au long d'un itinéraire de ski de montagne, devra également être explicable. Nos développements visent alors à reproduire la connaissance experte, en restant proche du raisonnement des experts et en exploitant les termes qu'ils emploient.

**Mots-clefs :** Évaluation du risque, Méthode de fusion, Données incertaines et imprécises



---

## Abstract

Mountain sports are subject to avalanche risk. In France, avalanches cause about 30 deaths annually among ski tourers, off-road skiers and mountaineers. This work aims to improve decision support to minimize the number of accidents and incidents arising in avalanche terrain each year. To this end, we make clear the requirements needed to improve the existing decision support methods. We then propose solutions that meet these requirements.

The research undertaken focuses specifically on the following:

- to identify, formalize and evaluate the elements to consider in the avalanche situation assessment;
- to determine a final result characterizing the vigilance required by practitioners in a local avalanche situation.

To help mountain professionals in their daily decision-making, our main objective is to consider heterogeneous and multi-source information, combine them and communicate a level of vigilance on which the user will base his analysis and decide. These works will apply information fusion methods to aggregate multiple heterogeneous criteria, resulting, for example, from field observations. This vigilance level appropriate to the local ski route should also be explainable. Then, our developments aim to reproduce expert knowledge, incorporating the terms they use and being mindful of their reasonings.

**Keywords :** Risk evaluation, Fusion methods, Uncertain and inaccurate data



# Acronymes

## Projet et partenaires

ASGM	Association Suisse des Guides de Montagne
ALÉA SARL	Avalanches : Localisation, Études, Actions Société A Responsabilité Limitée
CIME	Choix d'Itinéraire de MontagnE
HEIG-VD	Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud
HES-SO	Haute École Spécialisée de Suisse Occidentale
USMB	Université Savoie Mont Blanc

## Méthodes d'aide à la décision

ASM	<i>After Ski Method</i> (ou MRD, Méthode de Réduction pour Débutant)
ATP	<i>Avaluator Trip Planner</i>
Av	Avaluator
BVM	<i>Bounded Vigilance Method</i> , Méthode de vigilance encadrée
MRD	Méthode de Réduction pour Débutant
MRE	Méthode de Réduction Élémentaire
MRG	Méthode de Réduction Graphique
MRP	Méthode de Réduction Professionnelle
MRQ	Méthode de Réduction Quantitative
NT	NivoTest
OC	<i>Obvious Clues</i>
OCM	<i>Obvious Clues Method</i> , Méthode des indices évidents
SC	SnowCard
SoG	Stop or Go
SSD	<i>Systematic Snow-cover Diagnosis</i>
TGoNTG	<i>To Go or Not To Go</i>

## Autres acronymes

ACA	Association Canadienne des Avalanches
ACP	Analyse en Composantes Principales

ADAM	<i>Avalanche Danger Assessment Matrix</i> , Matrice d'Évaluation du Danger d'Avalanche
ATES	<i>Avalanche Terrain Exposure Scale</i> , Échelle d'exposition du terrain aux avalanches
BERA	Bulletin d'Estimation du Risque d'Avalanche
BM	<i>Bavarian Matrix</i>
CAH	Classification Ascendante Hiérarchique
CLPA	Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche
CMAH	<i>Conceptual Model of Avalanche Hazard</i>
CT	<i>Column Test</i> , Test de la colonne
D-Scale	<i>Destructive Size Scale</i> , Échelle de taille basée sur le potentiel de destruction
ECT	<i>Extended Column Test</i> , Test de la colonne étendue
ENSA	École Nationale de Ski et d'Alpinisme
EPA	Enquête Permanente des Avalanches
FCL	<i>Fuzzy Control Language</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i> , Système de positionnement par satellites
HCPC	<i>Hierarchical Clustering on Principle Components</i>
ISBA	Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère
LSHM	<i>Large Scale Hazard Mapping</i> , Cartographie à large échelle du danger
MEPRA	Modèle Expert d'Aide à la Prévision du Risque d'Avalanche
ML	<i>Machine Learning</i> , Apprentissage automatique
MNS	Modèle Numérique de Surface
MNT	Modèle Numérique de Terrain
PA	Propagation d'Affinité
PRA	<i>Potential Release Area</i> , Zone de départ potentiel
PST	<i>Propagation Saw Test</i> , Test de propagation à la scie
QCNF	Quantité Critique de Neige Fraîche
RAMMS	<i>RApid Mass Movement Simulation</i>
RETEX	RETour d'EXpérience
ROMANsns	Réseau d'Observations et de Mesures Avalanches et Neige en secteur non sécurisé
R-Scale	<i>Relative Size Scale</i> , Échelle de taille relative

SAFRAN	Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie
SAMOS	Snow Avalanche MOdelling and Simulation
SCM	SAFRAN-Crocus-MEPRA
SIG	Système d'Information Géographique
SLF	<i>Institut für Schnee und Lawinenforschung</i> , Centre de recherche sur la neige et les avalanches
SN	Surface Neige
SNGM	Syndicat National des Guides de Montagne
SSCM	SAFRAN-Sytron-Crocus-MEPRA
SURFEX	SURface EXternalisée
S2M	SAFRAN-SURFEX/ISBA-Crocus-MEPRA

**Critères principaux**

C2	Critère <i>Inclinaison des pentes</i>
C3	Critère <i>Observations d'avalanches récentes</i>
C4	Critère <i>Augmentation de température et fonte</i>
C5	Critère <i>Surcharges nouvelles</i>
C6	Critère <i>Couche fragile enfouie</i>

**Autres notations**

$\alpha$	Angle alpha, gradient moyen d'un couloir d'avalanche (angle formé par l'horizontale et la droite passant par l'extrémité du dépôt et le point de rupture le plus haut)
$\beta$	Angle beta, angle formé par l'horizontale et la droite passant par le Point $\beta$ et le point de rupture le plus haut
$\gamma$	Angle gamma, angle formé par l'horizontale et la droite passant par l'extrême limite du dépôt et le Point limite
$\Delta x$	Distance plane entre l'extrémité du dépôt et le Point $\beta$
$X_{\beta}$	Distance horizontale entre Point $\beta$ et le point de rupture le plus haut
Point $\beta$	Point du couloir d'avalanche où la pente passe d'une inclinaison supérieure à $10^{\circ}$ à une inclinaison inférieure à $10^{\circ}$
Point limite	Point du couloir d'avalanche où la pente passe d'une inclinaison supérieure à $30^{\circ}$ à une inclinaison inférieure à $30^{\circ}$
$RR$	Runout-Ratio
$D$	Dénivelé de la pente supérieure au Point limite
$D'$	Dénivelé de la pente inférieure au Point limite
$d$	Distance plane entre le point de rupture le plus haut et le point limite
$d'$	Distance plane entre le point limite et l'extrémité du dépôt
$\mu$	Moyenne
$\sigma$	Écart-type
$R$	Coefficient de corrélation
$bSS$	<i>Between Sum of Squares</i> , Inertie inter-classes
$tSS$	<i>Total Sum of Squares</i> , Inertie totale
$T$	t-norme
$\perp$	t-conorme

# Table des matières

Remerciements . . . . .	i
Résumé . . . . .	iii
Acronymes et notations . . . . .	vii
Table des matières . . . . .	xi
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 État de l'art</b>	<b>9</b>
1.1 Gestion du risque d'avalanche : état général des connaissances . . . . .	10
1.1.1 Un phénomène complexe : l'avalanche et ses facteurs contributeurs . . . . .	10
1.1.2 Classifications et mesure des avalanches . . . . .	13
1.1.3 Modèles et algorithmes . . . . .	13
1.1.4 Cartographie : événements historiques et aléas . . . . .	14
1.1.5 Estimation du danger et prévision . . . . .	15
1.1.6 Méthodes d'aide à la décision . . . . .	17
1.1.7 Synthèse . . . . .	18
1.2 Ski de montagne : un univers de méthodes d'aide à la décision . . . . .	19
1.2.1 Vue d'ensemble et évolutions . . . . .	19
1.2.2 Étude comparative basée sur quatre critères d'analyse . . . . .	25
1.2.3 Performance des méthodes et biais d'évaluation . . . . .	27
1.3 Émergence d'un besoin : recommandations et positionnement . . . . .	33
1.3.1 Cadre et recommandations . . . . .	33
1.3.2 La place de la méthode CRISTAL : cadre complémentaire . . . . .	36
1.3.3 Formulation d'un besoin . . . . .	38
<b>2 Des critères tangibles : décomposition et formalisation</b>	<b>41</b>
2.1 Niveau de danger du BERA . . . . .	44
2.2 Inclinaison des pentes . . . . .	46
2.2.1 Inclinaison des pentes et avalanches . . . . .	46
2.2.2 Décomposition du critère C2 <i>Inclinaison des pentes</i> . . . . .	49
2.3 Observations d'avalanches récentes . . . . .	54
2.3.1 Observations d'avalanches comme indicateur de danger . . . . .	54
2.3.2 Décomposition du critère C3 <i>Observations d'avalanches récentes</i> . . . . .	55
2.4 Augmentation de température et fonte . . . . .	60
2.4.1 Influence de la température sur le manteau neigeux . . . . .	60
2.4.2 Décomposition du critère C4 <i>Augmentation de température et fonte</i> . . . . .	61
2.5 Surcharges nouvelles . . . . .	62
2.5.1 Surcharges du manteau neigeux . . . . .	62
2.5.2 Décomposition du critère C5 <i>Surcharges nouvelles</i> . . . . .	65
2.6 Couche fragile enfouie . . . . .	66
2.6.1 Couche fragile et caractéristiques . . . . .	66

2.6.2	Décomposition du critère C6 <i>Couche fragile enfouie</i> . . . . .	67
2.7	Synthèse . . . . .	70
<b>3</b>	<b>Automatiser l'estimation des critères</b>	<b>73</b>
3.1	Distance d'arrêt des avalanches . . . . .	74
3.1.1	Modèles existants et leurs limites . . . . .	74
3.1.2	Fuzzification de la distance d'arrêt des avalanches . . . . .	75
3.2	Avalanches récentes et localisation du danger, partie 1 : Le point sur la situation et les méthodes exploitées . . . . .	85
3.2.1	Avalanches récentes et variabilité . . . . .	85
3.2.2	Apprentissage automatique . . . . .	86
3.3	Avalanches récentes et localisation du danger, partie 2 : Estimation de la criticité d'une avalanche du fait de la localisation . . . . .	90
3.3.1	Processus de classification multi-niveaux pour la détection de tendances météorologiques . . . . .	90
3.3.2	Estimation de la criticité d'une avalanche associée à une situation . . . . .	102
<b>4</b>	<b>Système de fusion pour l'aide à l'évaluation du mode de vigilance</b>	<b>109</b>
4.1	Système de fusion hiérarchique pour l'aide à la décision . . . . .	110
4.1.1	Système global pour l'aide à la décision : généralités . . . . .	110
4.1.2	Système hiérarchique : plusieurs niveaux de combinaison . . . . .	113
4.1.3	Intérêt de la théorie des sous-ensembles flous . . . . .	114
4.1.4	Méthode de conception du système de fusion . . . . .	127
4.2	Système de fusion : des éléments de base aux modes de vigilance . . . . .	130
4.2.1	Des cinq critères vers les modes de vigilance . . . . .	130
4.2.2	Niveaux d'agrégation préalables . . . . .	134
4.3	Mise en œuvre et validation . . . . .	138
4.3.1	Discussion : peut-on valider le système ? . . . . .	138
4.3.2	Cas concrets et amélioration continue . . . . .	139
4.3.3	Validation du système global . . . . .	147
4.3.4	Mise en œuvre et outils développés . . . . .	156
	<b>Conclusion générale</b>	<b>163</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>I</b>
	<b>Table des figures</b>	<b>XIX</b>
	<b>Liste des tableaux</b>	<b>XXIII</b>
<b>A</b>	<b>Étude comparative basée sur quatre critères d'analyse</b>	<b>XXV</b>
A.1	Critère 1 : Vue d'ensemble de la situation . . . . .	XXVI
A.1.1	Analyse à travers les critères de la formule 3x3 . . . . .	XXVI
A.1.2	Analyse à travers 6 critères liés au terrain et aux conditions . . . . .	XXVII
A.2	Critère 2 : Utilisation dans les différentes phases d'une randonnée à ski . . . . .	XXX
A.3	Critère 3 : Type de méthode : statistique ou experte . . . . .	XXXIII
A.3.1	Méthodes statistiques . . . . .	XXXIII
A.3.2	Méthodes expertes . . . . .	XXXVI
A.4	Critère 4 : Flexibilité et aspects subjectifs des méthodes . . . . .	XXXVI
A.4.1	Méthodes sans marge de manœuvre, entièrement contraintes et objectives . . . . .	XXXVII

---

A.4.2	Méthodes présentant des marges de manœuvre et aspects subjectifs . . . .	XXXVII
<b>B</b>	<b>Théorie des sous-ensembles flous</b>	<b>XXXIX</b>
B.1	Logique floue : généralités . . . . .	XL
B.1.1	Fuzzification . . . . .	XL
B.1.2	Inférence floue . . . . .	XLI
B.1.3	Défuzzification . . . . .	XLIV
B.2	Gestion des risques naturels et avalanches . . . . .	XLV
<b>C</b>	<b>Gestion des données manquantes</b>	<b>XLVII</b>
C.1	Méthodes de gestion des données manquantes étudiées . . . . .	XLVIII
C.2	Cas d'un jeu de données réel, comportant des données manquantes . . . . .	XLIX
C.3	Conclusions sur la gestion des données manquantes . . . . .	L
<b>D</b>	<b>Ensemble des règles du système</b>	<b>LI</b>
D.1	Règles de combinaison de niveau $n$ : des critères aux modes de vigilance . . . . .	LII
D.2	Règles de combinaison des niveaux préalables . . . . .	LIX
D.2.1	Règles de combinaison du niveau $n-1$ : des sous-critères au critère C2 . . . . .	LIX
D.2.2	Règles de combinaison du niveau $n-2$ : des paramètres au sous-critère C2.6 . . . . .	LXIII
<b>E</b>	<b>Publications</b>	<b>LXV</b>
E.1	Livrables du projet CIME . . . . .	LXVI
E.2	Publications dans des conférences . . . . .	LXVI



# Introduction générale

## Présentation globale, contexte et objectifs

Les avalanches causent chaque année de nombreuses victimes dans les régions montagneuses. Les dégâts et victimes engendrés peuvent être liés à l'existence d'infrastructures (habitations, routes, remontées mécaniques, ...). C'était le cas des avalanches bien connues et documentées du Tour, le 2 février 1978, causant 5 morts ou de Montroc à Chamonix, le 9 février 1999, engendrant le décès de 12 personnes. Cependant, ce sont avant tout les pratiquants de sports de montagne qui constituent la plupart des victimes d'avalanches. En France en effet, dans 95% des cas<sup>1</sup>, les accidents d'avalanches sont liés aux activités récréatives (encadrées ou non par un professionnel) telles que le ski de randonnée, le ski hors piste et l'alpinisme. On dénombre en moyenne une trentaine de décès par avalanche par an (d'après Montagne Leaders<sup>2</sup>, à partir du Bilan des accidents d'avalanche 2021-2022 de Frédéric Jarry, ANENA). Il en est de même en Amérique du Nord, où les avalanches causent environ 40 morts chaque année. Pour la saison 2022-2023, le centre d'information sur les avalanches du Colorado<sup>3</sup> compte actuellement 22 morts aux États-Unis et la moyenne annuelle du nombre de décès par avalanche est de 25 sur les années 2009-2010 à 2021-2022. Avalanche Canada<sup>4</sup> rapporte 12 décès par avalanche pour la saison en cours. Bien sûr, le bilan est encore plus lourd si l'on s'intéresse au nombre de personnes emportées ou ensevelies. Cependant, le nombre précis de cas reste indéterminé puisque ces incidents ne sont pas autant investigués et documentés que les accidents mortels.

Il faut noter par ailleurs que, dans la plupart des cas, les avalanches emportant des skieurs sont déclenchées par les skieurs eux-mêmes [Vontobel2013] [Cierco2013] [Harvey2018c]. En admettant que la plupart de ces accidents est liée à la pratique des sports de montagne, il semble alors important d'étudier les méthodes et outils qui traitent de la gestion du risque d'avalanche dans ce contexte. Sur le terrain, l'évaluation de la situation et les prises de décision sont soumises au risque d'avalanche. Pour aider les pratiquants de sports de montagne dans leur évaluation de la situation avalancheuse en cours et prendre les décisions les plus sûres possibles, il existe une grande variété de méthodes d'aide à la décision [Pourraz2019]. Il est en effet nécessaire, pour évaluer le risque encouru, de prendre en compte tout un ensemble d'informations portant sur les conditions météorologiques et nivologiques ainsi que sur la configuration du terrain. L'évaluation de chacune de ces informations n'est pas triviale et demande donc de l'expertise. C'est à cette fin que des méthodes ont émergé, permettant d'évaluer ces informations ainsi qu'un résultat de plus haut niveau, transcrivant idéalement une image globale de la situation. L'un des objectifs additionnels visé par ces méthodes est de s'abstraire de biais cognitifs en s'appuyant sur l'analyse d'informations qui soient le plus tangibles possible, i.e., directement observables et ne pouvant être remises en doute. Ce-

---

1. <https://www.georisques.gouv.fr/minformer-sur-un-risque/avalanche>
2. <https://www.montagneleaders.fr/infos/experts/frederic-jarry-2021-2022-le-bilan-des-accidents-davalanche/>
3. <https://avalanche.state.co.us/accidents/us>
4. <https://www.avalanche.ca/incidents>

pendant, même à l'issue de 30 années de développement et évolutions (la première méthode ayant émergé dans les années 1990), aucun consensus relatif à l'utilisation d'une méthode en particulier n'a émergé jusqu'à ce jour.

Puisqu'il existe de nombreuses méthodes d'aide à décision mais aucun consensus sur leur utilisation aujourd'hui, et surtout puisqu'il survient toujours de nombreux accidents impactant les pratiquants de sport de montagne et qu'ils expriment souvent un effet de surprise dans cette situation [Duclos2012], alors il s'avère utile de travailler à l'amélioration de l'aide à la décision face au risque d'avalanche. L'objectif est, par conséquent, de réduire encore les risques encourus, de prendre des décisions éclairées en ayant conscience de la situation en cours et de réduire au maximum les accidents et incidents. Dans ce cadre, nos travaux portent sur un système de fusion permettant de combiner les multiples informations (pouvant être imprécises et hétérogènes) nécessaires à l'évaluation du risque encouru et visant l'amélioration des méthodes d'aide à la décision existantes.

Cette thèse s'inscrit donc dans le domaine de la gestion du risque d'avalanche, domaine large allant de la compréhension des phénomènes à leur modélisation, leur classification, ou encore à la cartographie des aléas puis à l'estimation du danger et l'aide à la décision. Si ce domaine est large, il s'établit autour de deux aspects principaux : la gestion du risque vis-à-vis des infrastructures et la gestion du risque dans le cadre de la pratique des sports de montagne. Nous nous intéressons ici en particulier au second axe, nous conduisant à étudier l'univers des méthodes d'aide à la décision existantes en lien avec la pratique des sports de montagne et en particulier du ski. Si ces méthodes s'avèrent utiles et efficaces, elles restent insuffisantes, en témoignent les nombreux accidents toujours observés chaque année.

Ces travaux chercheront donc à apporter des clefs de lecture des différentes méthodes existantes, en identifier les points forts, les manques et donc les besoins permettant l'amélioration de leurs performances (efficacité d'utilisation, meilleure conscience de la situation en cours, amélioration des prises de décision).

L'objectif sera aussi de pouvoir objectiver la prise de décision afin de la rendre explicable en cas de besoin (cela pouvant en effet s'avérer nécessaire, devant un tribunal ou pour un retour d'expérience auprès d'autres experts par exemple). Il s'agira alors de rendre la prise de décision rationnelle, action particulièrement utile dans un contexte où le décideur peut être soumis à des contraintes additionnelles, telles que la pression ou la fatigue, source parfois d'une baisse d'attention ou de raccourcis de la pensée pouvant conduire à des décisions hâtives ou des erreurs de raisonnement. Il s'agira alors de rendre la prise de décision objective afin d'éviter les pièges heuristiques qui peuvent induire une perception faussée du danger.

Ainsi, les travaux présentés dans ce manuscrit portent sur trois besoins principaux :

1. identifier et comprendre les principaux critères intervenant dans l'évaluation de la situation avalancheuse en cours en se basant sur des informations tangibles ;
2. savoir évaluer ces critères en envisageant une éventuelle automatisation afin de réduire les biais ;
3. combiner ces différents critères en un résultat final interprétable par l'utilisateur, c'est-à-dire compréhensible, clair et explicable, afin d'être le support de son analyse et de sa réflexion pour sa prise de décision.

Nos travaux s'inscrivent dans le cadre d'un projet soutenu par le programme européen de coopération transfrontalière Interreg France-Suisse 2014-2020. Ce projet a bénéficié, à ce titre, d'une subvention européenne (Fonds Européen de Développement Régional) couvrant 60% du coût total français. Il s'agit du projet *Choix d'Itinéraire de Montagne*<sup>5</sup> (CIME), dont l'objectif est de fournir des outils d'aide à la décision et outils logiciels pour assister les professionnels de la montagne dans leurs choix d'itinéraire, tant dans leur pratique hivernale, dépendante du danger

---

5. <https://www.interreg-francesuisse.eu/beneficiaire/cime/>

d'avalanche, qu'estivale, en fonction des contraintes techniques des terrains rencontrés (roche, glace et terrain mixte). Les travaux présentés dans ce manuscrit s'inscrivent donc dans le volet lié au *ski de montagne* couvert par le projet CIME.

Ce projet est porté, par l'Université Savoie Mont Blanc (USMB) pour la partie française et la Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD) pour la partie suisse. De plus, il regroupe plusieurs partenaires de part et d'autre de la frontière :

- ALEA SARL, Avalanches : localisation, études et actions ;
- Association data-avalanche.org ;
- Haute École Spécialisée de Suisse Occidentale (HES-SO) Valais ;
- Association Suisse des Guides de Montagne (ASGM).

De nombreux accidents impactent des personnes expérimentées et des professionnels de la montagne. Les travaux développés dans le cadre du projet CIME sont spécifiquement à destination des professionnels de la montagne.

Dans ce projet, nous travaillons en particulier avec Alain Duclos, nivologue et expert en avalanches (en haute montagne, pour les domaines skiables et les voies de communication), dont nous cherchons à recueillir l'expertise. Il est le gérant de la société ALÉA SARL (Avalanches : Localisation, Études, Actions) et le fondateur de l'association data-avalanche.org, à l'origine de la démarche CRISTAL. Ainsi, du fait des partenaires associés au projet, nous travaillons plus spécifiquement sur la démarche CRISTAL, l'une des méthodes d'aide à la décision existante, portée par l'association data-avalanche.org. Si une partie des développements conduits dans cette thèse est générale et peut concerner l'ensemble des méthodes d'aide à la décision existantes, des développements plus spécifiques portent sur CRISTAL, qui constitue alors un cadre complémentaire pour nos travaux. CRISTAL est donc à la fois le point de départ de ces travaux, notre cadre de développement, ainsi que notre cadre d'expérimentation et de validation.

Notons que puisque nos travaux ciblent en particulier les professionnels de la montagne, nous avons décidé de suivre une approche qui consiste à reproduire la connaissance de l'expert pour l'évaluation du danger d'avalanche. Une approche se passant de l'expert aurait pu être envisagée avec l'utilisation du *deep learning* à partir de mesures capteurs par exemple. Cependant, l'ensemble des résultats obtenus serait alors plus difficilement explicable, en particulier pour des professionnels de la montagne qui doivent être en mesure de comprendre, expliquer et justifier les éléments sur lesquels ils ont basé, ensuite, leur prise de décision. Ils doivent pour cela avoir un haut degré de confiance dans les résultats communiqués, c'est pourquoi nous tenions à maîtriser davantage l'ensemble du processus et adopter une approche de type *boîte blanche* plus que *boîte noire*, une approche qui soit à la fois transparente et proche du raisonnement expert et qui puisse être facilement explicable et compréhensible pour le public cible.

## Éléments de définition

Avant d'entrer plus en détail sur les problèmes que cherche à résoudre cette thèse, il est nécessaire de définir les termes du sujet et d'aborder en particulier la notion de *danger d'avalanche*. Pour ce faire, il est naturel de présenter les cinq situations typiques d'avalanche qui constituent un consensus à l'échelle européenne. Ces cinq situations avalancheuses typiques sont les suivantes :

1. neige fraîche (voir pictogramme en Figure 0.1a),
2. neige soufflée (ventée) (voir pictogramme en Figure 0.1b),
3. neige ancienne (couche fragile persistante) (voir pictogramme en Figure 0.1c),
4. neige mouillée (humide) (voir pictogramme en Figure 0.1d),

5. avalanches de glissement (avalanches de fond) (voir pictogramme en Figure 0.1e).

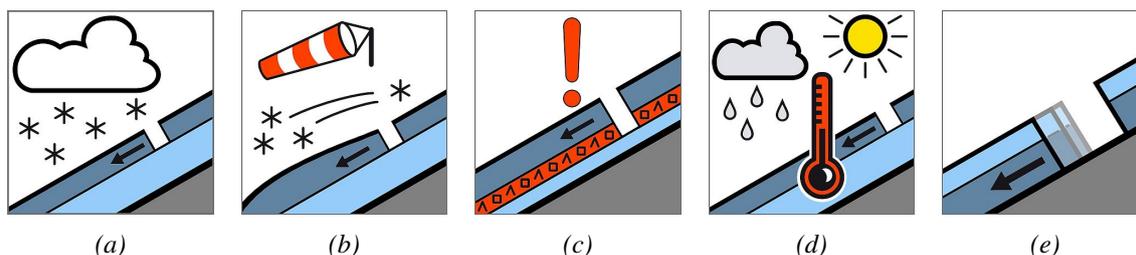


Figure 0.1 – Pictogrammes européens des différentes situations avalancheuses typiques

Le type d’avalanche caractérisant la situation va jouer un rôle majeur sur les comportements à adopter sur le terrain [Atkins2004]. Ces cinq situations typiques sont une première base permettant de faire émerger les critères spécifiques à prendre en compte dans l’évaluation du danger d’avalanche.

D’abord, la situation relative à la *neige fraîche* (Figure 0.1a) est liée à la chute de neige en cours ou récente, cette dernière engendrant une surcharge du manteau neigeux. Il en est de même en ce qui concerne la situation liée à la *neige soufflée* (ou ventée) (Figure 0.1b) puisque le transport de neige par le vent, pendant ou après une chute de neige, va induire des surcharges locales du manteau neigeux et la potentielle formation de plaques. Ainsi, ces deux situations font émerger un critère relatif aux **Surcharges nouvelles**, liées à l’accumulation de neige par le vent, ou aux précipitations neigeuses.

Ensuite, la situation relative à la *neige mouillée* (ou humide) (Figure 0.1d) est liée à la déstabilisation du manteau neigeux du fait de la présence d’eau liquide dans ce dernier. L’humidité du manteau neigeux provient soit de la fonte de la neige soit d’un épisode pluvieux. Notons aussi qu’une forte augmentation de température, même sans fonte, est source de déstabilisation du manteau neigeux. Cette situation fait donc émerger le critère **Augmentation de température et fonte**. Notons cependant que les précipitations sous forme de pluie contribuent (en plus de son humidification) à la surcharge du manteau neigeux. Elles complètent donc le critère relatif aux Surcharges nouvelles présenté à l’issue des pictogrammes 0.1a et 0.1b.

Enfin, la situation relative à la *neige ancienne* (Figure 0.1c) est liée à la présence d’une ou plusieurs couches fragiles persistantes dans le manteau neigeux. Ces couches fragiles enfouies vont permettre le mécanisme de déclenchement d’avalanches de plaques. Ainsi, cette situation fait ressortir le critère **Couche fragile enfouie**.

Nous pouvons noter que si les pictogrammes proposés veulent traduire des situations distinctes, ils comportent tout de même des ambiguïtés. D’une part, un pictogramme regroupe parfois plusieurs situations :

- pictogramme 0.1c, il n’existe pas seulement des couches fragiles permanentes mais aussi des couches fragiles temporaires ;
- pictogramme 0.1d, les précipitations sous forme de pluie agissent à la fois sur l’humidification du manteau neigeux et la surcharge de ce dernier.

D’autre part, en réalité, c’est souvent le cumul de plusieurs situations évoquées par les pictogrammes qui est mis en jeu. Sauf en cas de départ spontané, dans les situations correspondant aux pictogrammes 0.1a, 0.1b et 0.1d, il y a présence d’une couche fragile enfouie dans le manteau neigeux (pictogramme 0.1c). Par ailleurs, l’activation d’une couche fragile enfouie dans le manteau neigeux (pictogramme 0.1c) est très souvent induite par la présence d’une surcharge nouvelle (pictogrammes 0.1a, 0.1b et 0.1d) ou par un réchauffement du manteau neigeux (pictogramme 0.1d), influençant son évolution et la métamorphose des grains qui le constituent. Ainsi les cinq situations typiques d’avalanches et les pictogrammes qui en découlent à l’échelle européenne, s’ils paraissent très cloisonnés, présentent actuellement des ambiguïtés et inter-relations.

Les avalanches de glissement (aussi appelées avalanches de fond) (Figure 0.1e) ne jouent pas un rôle déterminant pour les skieurs pendant les randonnées à ski [Harvey2018c]. Il s'agit en effet d'un type d'avalanche particulier dont le moment de déclenchement est imprévisible même si des signes typiques (appelés gueules de baleine) peuvent être identifiés sur le terrain. Ces avalanches ne peuvent pas être déclenchées par les skieurs eux-mêmes et, le plus souvent, elles commencent doucement, avec l'ouverture préalable de gueules de baleine dans le manteau neigeux [SLF2019]. Pour le skieur, ce type d'avalanche s'apparente donc davantage à une menace similaire à celle liée à la présence de séracs (dont la chute menace les skieurs) qu'aux autres types d'avalanches. En effet, dans les autres cas d'avalanches, soit les skieurs sont susceptibles de les déclencher eux-mêmes, soit, dans le cas de départs spontanés (i.e., naturels), les avalanches sont directement liées à une évolution des conditions (notamment du fait de surcharges récentes ou d'une augmentation de température) et ont lieu dans les quelques heures suivant ce changement. Sur le terrain, les skieurs doivent donc éviter de s'exposer à ce danger, en évitant de s'attarder inutilement sous des gueules de baleine, au même titre qu'ils éviteraient de s'attarder sous des séracs. Ces avalanches particulières sont alors laissées à l'écart dans le cadre de nos travaux.

En plus des trois principaux critères mentionnés ci-avant (i.e., *Surcharges nouvelles, Augmentation de température et fonte, Couche fragile enfouie*) dégagés en analysant les pictogrammes européens, il est aujourd'hui communément admis que le critère *Inclinaison des pentes* a un rôle dans le déclenchement des avalanches. De même, et comme l'énonce le nivologue américain Bruce Tremper : "*le meilleur signe de danger d'avalanche, c'est les avalanches*", d'où la présence de l'association data-avalanche dans le consortium du projet CIME. En effet, les *Observations d'avalanches récentes* sont le seul critère tangible qui prouve la présence d'une couche fragile avérée dans le manteau neigeux et associée à une forte propagation de la rupture. L'observation d'une avalanche de plaque sur le terrain prouve la mise en œuvre du mécanisme de déclenchement des plaques dans lequel intervient une amorce et une propagation de rupture dans la couche fragile enfouie dans le manteau neigeux.

Une structure de plaque dans le manteau neigeux correspond à une couche fragile surmontée par une ou plusieurs couches de neige de plus forte cohésion formant la plaque (Figure 0.2a). Cette dernière peut avoir une forte cohésion, c'est le cas pour une plaque à vent qui produira une avalanche de blocs, mais peut également être de faible cohésion, par exemple lors d'une chute de neige sans vent qui produira une avalanche avec un aérosol.

Le mécanisme de déclenchement d'une avalanche de plaque repose sur trois étapes successives (Figure 0.2a) :

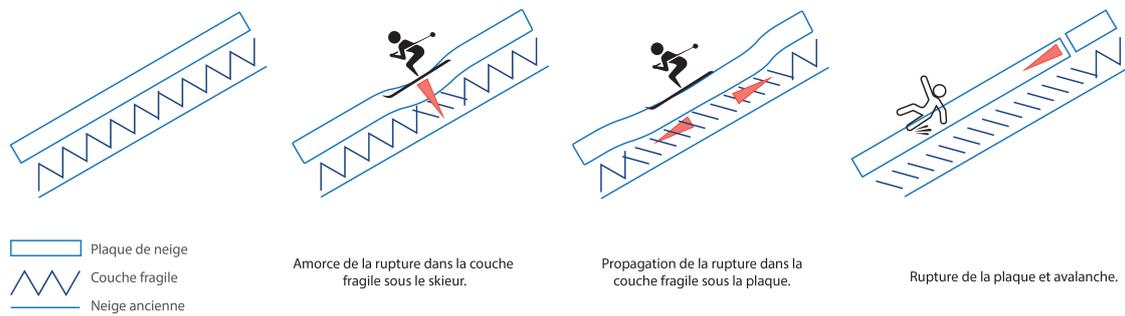
1. amorce d'une rupture dans la couche fragile (dans le cas d'un déclenchement provoqué par un skieur, cette amorce de rupture a lieu à l'aplomb du skieur) ;
2. propagation de la rupture dans la couche fragile, i.e., sous la plaque ;
3. rupture de la plaque et avalanche.

La rupture de la plaque est liée à l'inclinaison de la pente. Elle peut alors avoir lieu à distance, bien en amont de la position du skieur (Figure 0.2b). Cette rupture a lieu en effet sur une pente dont l'inclinaison est suffisante pour que les forces de tractions dépassent les forces de résistance et permettent la rupture de la plaque (Figure 0.3).

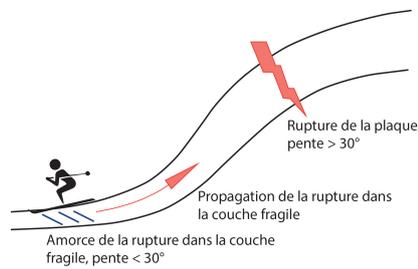
## Problématique de recherche

Pour reprendre ce qui a été brièvement mentionné plus haut, cette thèse cherche donc à couvrir un double objectif visant à l'amélioration des méthodes d'aide à la décision existantes.

1. D'une part, elle a pour objectif de permettre la compréhension et l'estimation des critères

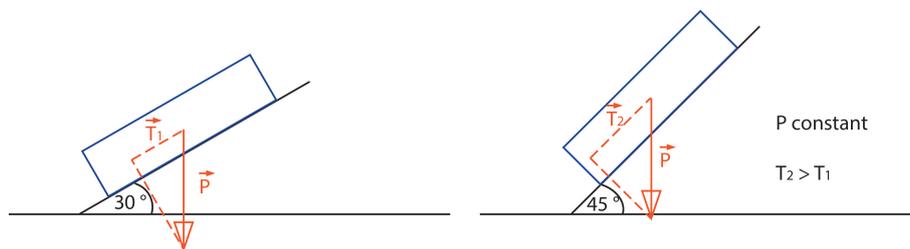


(a) Structure de plaque et mécanisme de déclenchement



(b) Déclenchement à distance

Figure 0.2 – Déclenchement d'une avalanche de plaque (Source : schémas réalisés à partir de A. Duclos - Trame formation gestion de risque 2018 ENSA <https://prezi.com/pdji58daggl/trame-formation-gestion-de-risque-2018-partag-en-sa/?frame=bf704231dc5d9f331cd6ce02aa5426641d3bfc>)



Avec l'augmentation de la pente, pour un poids  $P$  constant, les forces de tractions augmentent.

Figure 0.3 – Évolution des forces de traction en fonction de la pente

principaux mentionnés ci-dessus, critères à prendre en considération dans l'évaluation de la situation avalancheuse en cours. Ces critères sont en effet qualitatifs et peu ou pas définis ; il n'existe pas de cadre pour les évaluer. Cette thèse s'articule donc autour d'une première question de recherche qui vise à proposer des façons d'évaluer ces principaux critères. Cela demande donc de les décrire, car s'ils sont simples (et donc faciles à concevoir et mémoriser), ils ne sont pas simplistes (ils sont donc complexes, à l'image du phénomène étudié). Ainsi, une fois compris l'ensemble des éléments intervenant dans l'évaluation de la situation avalancheuse en cours, il s'agira de pouvoir les évaluer et, autant que possible, optimiser leur évaluation à travers une éventuelle automatisation.

Pour résumer, il s'agit de **définir** quels sont les critères à prendre en compte pour évaluer le danger d'avalanche, les **formaliser** et proposer une façon d'**estimer la valeur** que peut prendre chacun de ces critères.

2. D'autre part, cette thèse a pour objectif de faire émerger, à partir de ces principaux critères, un résultat de plus haut niveau, facilement interprétable par l'utilisateur final, c'est-à-dire une information lui permettant de se faire une idée globale de la situation analysée. Elle devra donc dégager des règles de combinaison permettant de **fusionner** ces différents critères et l'ensemble des éléments qui les composent, éléments décrits et évalués en réponse à la première question de recherche.

La problématique de recherche portée par ces travaux repose donc sur deux questions séquentielles.

## Structuration du manuscrit

Pour répondre à notre problématique de recherche, ce manuscrit est structuré en quatre chapitres.

Le **Chapitre 1** fait état des connaissances actuelles ; il vise à présenter le domaine et cibler à travers trois niveaux successifs le positionnement de ces travaux. Une première partie présente l'ensemble des thématiques qui composent le domaine de la gestion du risque d'avalanche. Une deuxième partie cible la gestion du risque d'avalanche pour la pratique des sports de montagne et en détaille les méthodes et outils d'aide à la décision. Enfin, une dernière partie aborde la place de la démarche CRISTAL support de nos travaux.

Le **Chapitre 2** fait émerger la complexité du phénomène étudié grâce à la décomposition des cinq critères principaux. Il répond donc pour partie à la première question de recherche. Le Chapitre 2 formalise et décrit ainsi ces critères principaux en faisant émerger les sous-critères auxquels ils font appels pour être évalués, ainsi que les valeurs qu'ils peuvent prendre.

Le **Chapitre 3** présente l'automatisation de l'estimation de sous-critères qui offre un cadre précis et une diminution des biais d'évaluation potentiellement induits par l'utilisateur. Il termine alors de répondre à la première question de recherche en permettant d'estimer les valeurs que prennent les différents sous-critères.

Le **Chapitre 4** présente, dans un premier temps, le système de fusion hiérarchique développé pour passer des éléments de base (identifiés au Chapitre 2) aux valeurs de sorties. Il répond donc à la seconde question de recherche. Il repose pour cela sur une approche experte, basée sur plusieurs niveaux d'agrégation. Il donne, dans un second temps, la mise en œuvre et la validation du système de fusion développé. Il propose ainsi une phase de validation à partir de cas concrets.

Les **conclusions** et **perspectives** de ces travaux sont données à l'issue de ces quatre chapitres.

Enfin, quatre annexes s'articulent autour de chacun des chapitres.

L'**Annexe A** complète l'état de l'art donné au premier chapitre et décrit une étude comparative des

## TABLE DES MATIÈRES

---

méthodes d'aide à la décision existantes basée sur quatre critères d'analyse.

L'**Annexe B** aborde la théorie des sous-ensembles flous à travers quelques connaissances générales limitées aux notions utilisées dans ce mémoire et des cas d'application dans la gestion des risques naturels.

L'**Annexe C** traite de la gestion des données manquantes afin d'enrichir le troisième chapitre. Elle aborde différentes façons d'estimer les données manquantes et présente leur impact dans le cadre de nos travaux.

L'**Annexe D** donne l'ensemble des règles du système de fusion hiérarchique développé.

# 1

## État de l'art

---

*Ce chapitre fournit au lecteur une vision d'ensemble du domaine de la gestion du risque d'avalanche. Il présente les différentes thématiques abordées dans ce contexte. Ensuite, si la littérature s'intéresse le plus souvent à la gestion du risque d'avalanche vis-à-vis des infrastructures, nous ciblons ici le contexte de la gestion du risque d'avalanche dans la pratique des sports de montagne. Enfin, dans ce cadre, une dernière partie présente les besoins qui se dégagent des méthodes d'aide à la décision existantes. Ces derniers permettent alors de faire émerger notre question de recherche, qui s'appuie sur le positionnement particulier de l'une des méthodes, la démarche **CRISTAL**.*

---

### Sommaire

---

<b>1.1</b>	<b>Gestion du risque d'avalanche : état général des connaissances</b>	<b>10</b>
1.1.1	Un phénomène complexe : l'avalanche et ses facteurs contributeurs	10
1.1.2	Classifications et mesure des avalanches	13
1.1.3	Modèles et algorithmes	13
1.1.4	Cartographie : événements historiques et aléas	14
1.1.5	Estimation du danger et prévision	15
1.1.6	Méthodes d'aide à la décision	17
1.1.7	Synthèse	18
<b>1.2</b>	<b>Ski de montagne : un univers de méthodes d'aide à la décision</b>	<b>19</b>
1.2.1	Vue d'ensemble et évolutions	19
1.2.2	Étude comparative basée sur quatre critères d'analyse	25
1.2.3	Performance des méthodes et biais d'évaluation	27
<b>1.3</b>	<b>Émergence d'un besoin : recommandations et positionnement</b>	<b>33</b>
1.3.1	Cadre et recommandations	33
1.3.2	La place de la méthode CRISTAL : cadre complémentaire	36
1.3.3	Formulation d'un besoin	38

---

## 1.1 Gestion du risque d'avalanche : état général des connaissances

Les principaux concepts liés aux notions de risque, de danger et d'exposition, sont présentés par Statham [Statham2008] qui les aborde en particulier dans le contexte du risque d'avalanche. Le danger d'avalanche correspond à une source potentielle de dommage. Il est indépendant des éléments à risque. Ainsi, le danger peut être très élevé alors qu'aucun élément (matériel ou humain) n'est exposé. À l'inverse du danger, le risque d'avalanche est quant à lui lié à l'exposition d'un élément à risque. Son niveau va donc dépendre de la vulnérabilité de cet élément au danger.

De manière générale dans la littérature, deux guides principaux traitent de la gestion du risque d'avalanche dans sa globalité pour fournir une vue d'ensemble des mesures d'évaluation, de caractérisation et de gestion du risque d'avalanche. Ces deux ouvrages, principalement dédiés aux professionnels spécialistes des avalanches (gestionnaires, experts-conseil, bureaux d'ingénieurs, services de l'État, prévisionnistes...), sont :

- un document nord-américain (canadien) sur les *aspects techniques de la gestion des risques d'avalanche* [ACA2015],
- un document européen (qui aborde en particulier les contextes réglementaires français et suisse) sur la *dynamique des avalanches*, fournissant une approche à la fois qualitative (naturaliste) et quantitative (calculatoire) de la nivologie [Ancey2006].

Si le premier document se veut plutôt être un guide technique pour les gestionnaires, le second cherche davantage à fournir des méthodes de calcul et approches pour caractériser la dynamique des avalanches et prédéterminer leurs comportements. La lecture de ces documents permet de prendre conscience de l'étendue des thématiques relatives à la gestion du risque d'avalanche. Une fouille plus approfondie de la littérature permet de renseigner les nombreux sous-domaines relatifs à ce contexte. Nous présentons ici les principaux travaux concernés à travers une division en six grandes parties : 1) l'avalanche et ses facteurs contributeurs, 2) classifications et mesure des avalanches, 3) modèles et algorithmes, 4) cartographie : événements historiques et aléas, 5) estimation du danger et prévision, 6) méthodes d'aide à la décision.

### 1.1.1 Un phénomène complexe : l'avalanche et ses facteurs contributeurs

L'avalanche est un phénomène complexe. Schweizer et al. décrivent en effet en 2003 la formation d'avalanches comme "*l'interaction complexe entre le terrain, le manteau neigeux et les conditions météorologiques*" [Schweizer2003]. Cette interaction conduit aux cinq situations typiques d'avalanches présentées en Introduction. Les auteurs évoquent à ce sujet les facteurs contributeurs suivants : le terrain, la neige récente, le vent, la température, ainsi que la stratigraphie du manteau neigeux. Ces facteurs décrivent et coïncident avec les cinq critères principaux associés aux situations typiques d'avalanche faisant consensus au niveau européen (voir Introduction).

De manière générale dans la littérature, ces facteurs contributeurs (i.e. les facteurs qui interviennent dans le déclenchement des avalanches) sont souvent évoqués puisqu'ils sont à l'origine des critères de base pris en considération dans les méthodes et outils d'aide à la décision (voir Section 1.1.6). Landrø et al., dans de récentes études, présentent à ce sujet les facteurs utilisés dans les méthodes et par les experts ; ils font état de 53 facteurs différents [Landrø2020a] [Landrø2020b]. Nous pouvons présenter ces facteurs à travers trois principales catégories : les facteurs nivométéorologiques, les facteurs liés au terrain ainsi que les facteurs humains. Ces trois catégories de facteurs sont celles utilisées dans le cadre de la formule 3x3 de Munter [Munter2003], formule qui fait consensus aujourd'hui en matière de structuration de la pensée dans le processus d'évaluation du risque d'avalanche.

Cependant, seule les deux premières catégories correspondent à des facteurs contributeurs à proprement parler. La troisième catégorie de facteurs (facteurs humains), correspond davantage à des facteurs contributeurs des accidents d'avalanche, les biais humains et erreurs influençant en effet

l'analyse et la décision sur le terrain [Fredston1994] [Atkins2000] [McCammon2004a] [McCammon2009a] [Cierco2013]. L'étude de Furman et al., en 2010, montre en effet que les heuristiques et le goût plus ou moins prononcé pour la prise de risque influencent la prise de décision [Furman2010]. Plusieurs études montrent aussi que les facteurs humains et le groupe jouent un rôle prépondérant à la fois dans la prise de décision et dans l'accidentologie : des différences sont en effet observées selon la taille du groupe [Zweifel2012] [Zweifel2016], selon le niveau de compétence des membres du groupe (générant des différences dans leur analyse du terrain, leur lecture du bulletin et les observations qu'ils font sur le terrain) [Hallandvik2017], ou encore selon la composition des membres du groupe (âge, niveau d'expérience estimé et motivations influençant leur propension à la prise de risques) [Zweifel2012].

Au-delà de cette vision d'ensemble faisant état de nombreux facteurs nivo-météorologiques et facteurs liés au terrain, des recherches portent spécifiquement sur l'analyse et la compréhension des différents facteurs contributeurs. Nous nous intéressons alors dans cette section aux travaux développés sur l'un ou l'autre des facteurs pris individuellement.

### Facteurs nivo-météorologiques

Les facteurs nivo-météorologiques qui peuvent avoir une influence directe sur le déclenchement d'avalanches résident dans l'augmentation de température et l'apport d'une surcharge additionnelle du manteau neigeux.

Dans la littérature, plusieurs études s'intéressent aux effets de la température [Mcclung1996] [Schweizer2010a] [Schweizer2013]. Ces différentes publications abordent la question d'un réchauffement de l'air affectant la surface du manteau neigeux et influençant la dureté et la résistance des différentes couches, engendrant alors l'instabilité du manteau neigeux. Ce sont des réchauffements décrits comme nets, rapides et significatifs qui sont source d'instabilité. Ces différentes études font état d'effets directs, puis d'effets à retardement, qui affectent différemment la stabilité du manteau neigeux : respectivement vers une diminution de la stabilité et une augmentation de la stabilité [Mcclung1996] [Schweizer2003]. De plus, [Schweizer2010a] évoquent l'effet de la radiation, associé au vent, comme une source importante de réchauffement. L'importance du rayonnement et du vent est confirmée dans [Harvey2018c] à travers la notion de bilan énergétique. Enfin, la question du phénomène inverse, i.e. d'un refroidissement, est aussi soulevée dans certaines études [Mcclung1996] [Schweizer2013].

D'autres études s'intéressent, comme évoqué, à l'impact d'une surcharge du manteau neigeux sur sa stabilité. Munter en particulier a été le premier à s'intéresser aux "*quantités critiques de neige fraîche pour les skieurs*" [Munter2003], ce qui l'a conduit à faire émerger des seuils indicatifs, qui diffèrent par conditions favorables et défavorables. Ces seuils critiques de surcharge, comme questionnés dans la littérature, diffèrent aussi dans le cadre d'avalanches spontanées (naturelles) et d'avalanches déclenchées par les skieurs (accidentelles) [Munter2003] [Schweizer2003]. Il faut noter, de plus, que la surcharge du manteau neigeux, au-delà d'être induite par de récentes précipitations, peut aussi être générée par le transport de la neige par le vent. De nombreuses études s'intéressent en effet au transport de la neige par le vent, à sa répartition et à ses effets sur le manteau neigeux [Mases1995] [Michaux2002] [Naaim-Bouvet2010] [Naaim-Bouvet2012] [Guyomarc'H2012] [Vionnet2012b] [Vionnet2014]. Ces études, accompagnées de campagnes de mesures sur le terrain, visent à la modélisation et simulation du transport de la neige par le vent. En 2002, Naaim-Bouvet et Naïm proposent alors un état de l'art des processus physiques qui entrent en jeu lors de ce transport [Naaim-Bouvet2002].

D'autres études s'intéressent spécifiquement aux capteurs dédiés à la mesure du transport de la neige par le vent [Sato1993] [Lehning2002] [Trouvilliez2015]. Le capteur acoustique FlowCapt a été particulièrement étudié [Chritin1999] [Jaedicke2001] [Lehning2008] [Trouvilliez2015] et est aujourd'hui implanté dans plusieurs stations de mesures, dont 13 réparties sur les départements de la Savoie et de l'Isère dans les Alpes françaises. Ces capteurs sont aussi évalués et utilisés pour

réaliser des observations dans d'autres régions du monde (Himalaya indien, Antarctique et Altai par exemple) [Das2012] [Trouvilliez2013] [Zhang2022]. Enfin, Cierco, en 2007, propose une aide à l'interprétation des données FlowCapt [Cierco2007].

Le manteau neigeux est lui aussi largement étudié. Ceci se traduit essentiellement par l'étude de sa stratigraphie et de la présence de couches fragiles, étude qui se structure d'abord autour des tests de stabilité. De nombreux tests nivologiques existent en effet pour évaluer la stratigraphie du manteau neigeux et sa stabilité. Ces nombreux tests sont souvent présentés et discutés dans la littérature. Trois documents français, américain et canadien présentent en détail les différents tests [ANENA2002] [AAA2010] [ACA2016]. D'autres publications portent plus spécifiquement sur l'un ou l'autre de ces tests, comme le test du bloc glissant discuté dans [Föhn1987] [Schweizer2002] [Campbell2004] ou le test de la colonne étendue [Techel2020b]. Schweizer et Jamieson, en 2010, publient une comparaison des différents tests [Schweizer2010b]. Les deux tests développés les plus récemment (test de la colonne étendue (ECT pour *Extended Column Test*) et test de propagation à la scie (PST pour *Propagation Saw Test*)) portent davantage sur la propagation de la rupture que sur son amorçage. Les tests comme ECT, PST et *rutschblock test*, qui incluent la propagation de la rupture, donnent en général des résultats plus précis, contrairement aux tests qui étudient des plus petites surfaces, comme le test de compression. Par contre, même pour des personnes expérimentées, les auteurs indiquent qu'un taux d'erreur de 5 à 10 % est attendu, et que la réalisation d'un second test adjacent au premier permet d'augmenter la fiabilité [Schweizer2010b].

Les tests nivologiques donnent une information ponctuelle de l'état du manteau neigeux, tandis que ce dernier présente une forte variabilité [Schweizer2008]. Plusieurs auteurs s'intéressent alors à la variabilité du manteau neigeux à différentes échelles [Kronholm2002] [Schweizer2006] [Schweizer2007].

Enfin, ce sont les processus de déclenchement, d'amorce et de propagation d'une rupture dans le manteau neigeux, qui sont étudiés pour en comprendre les différents mécanismes [Fyffe2006] [Heierli2008] [van Herwijnen2009] [Monti2016] [Gaume2017b] [Gaume2017a] [Gaume2018a] [Gaume2018b] [Gaume2018c]. De manière générale, les développements scientifiques relatifs aux avalanches sont pluridisciplinaires et adoptent une approche qui couvre à la fois les observations et expérimentations sur le terrain, ainsi que des analyses mathématiques et modèles physiques [Louchet2020]. Les travaux relatifs aux mécanismes de déclenchement des avalanches sont les principaux concernés par ces développements physiques et mathématiques.

### Facteurs liés au terrain

Parmi les facteurs liés au terrain, l'inclinaison de la pente est le facteur le plus largement étudié, notamment dans le cadre cité ci-avant de l'étude des mécanismes de déclenchement [Perla1977] [Schweizer2001a] [Schweizer2001b] [Schweizer2003] [Fyffe2006] [Heierli2008] [van Herwijnen2009] [McCammon2009b] [Vontobel2013] [Veitinger2016a]. La pente joue en effet un rôle prédominant sur le déclenchement des avalanches. Si aucune étude ne le démontre strictement, un consensus est cependant établi autour de la valeur seuil de 30°, en-delà de laquelle l'inclinaison de la pente est insuffisante pour permettre le déclenchement d'avalanches.

Concernant le terrain, de nombreux facteurs sont en réalité pris en compte et étudiés : la topographie de manière générale, la micro-topographie, la forme du terrain (convexe, concave), mais aussi la rugosité ou encore la présence de forêt [Schweizer2003] [Vontobel2013] [Bebi2016]. D'ailleurs, l'étude de l'influence du terrain sur le déclenchement des avalanches a conduit, au Canada, au développement d'une échelle d'exposition du terrain aux avalanches (ATES, pour *Avalanche Terrain Exposure Scale*) [Statham2006]. *In fine*, l'ATES est un système qui permet de classer les terrains selon trois catégories (*simple, challenging, complex*) sur la base de 11 critères qualitatifs et quantitatifs. Des études ont ensuite réutilisé cette échelle pour réaliser des cartes et zonages de l'exposition des terrains aux avalanches [Campbell2010] [Campbell2012] [Camp-

bell2013].

Pour finir, des études se tournent de plus en plus vers l'utilisation de SIG pour identifier les zones de départ d'avalanches sur la base de nombreux paramètres de terrain. Cette remarque, relative à l'identification des zones de départ (appelée PRA pour *Potentiel Release Areas*) sera principalement approfondie et présentée dans la section dédiée aux modèles et algorithmes (voir Section 1.1.3).

Si l'avalanche est un phénomène complexe, faisant intervenir de nombreux facteurs contributeurs, elle peut alors se réaliser sous différentes formes. De ce fait, le phénomène avalanche donne naissance à plusieurs classifications possibles.

### 1.1.2 Classifications et mesure des avalanches

Il n'existe pas *une unique* mais plutôt *des* classifications d'avalanches. Les avalanches peuvent en effet être classées selon plusieurs critères : les causes de départ (avalanches provoquées ou spontanées), les types de départ (départs ponctuels ou linéaires), ou encore les types d'écoulement (avalanches denses ou en aérosols), voire les types d'avalanches (avalanches de plaques, de neige sans cohésion, de glissement) [ANENA] [Sivardière2009] [SLF2019] [EAWS2021a]. La publication de Rapin, en 2002, montre aussi qu'il existe plusieurs types de classifications possibles (basées sur trois concepts : l'événement lui-même, le phénomène physique ou encore le risque, ce qui donne lieu aux classifications suivantes : classification morphologique, classification dynamique, l'échelle européenne du risque d'avalanche, ainsi que des échelles d'intensité : échelle américaine, échelle canadienne et classification suisse) [Rapin2002]. Dès 1996, Ancey et Charlier proposent d'ailleurs "*Quelques réflexions autour d'une classification des avalanches*" [Ancey1996].

Les avalanches peuvent aussi être classées selon leur taille ; mais les échelles de tailles d'avalanches sont elles aussi multiples. McClung et Schaerer, en 1980, font état des échelles alors utilisées aux États-Unis, au Japon, en Suisse et au Canada [McClung1980].

En Amérique du Nord, deux échelles existent : l'échelle R-Scale (pour *Relative Size Scale*) aux États-Unis, d'une part, et l'échelle D-Scale (pour *Destructive Size Scale*) au Canada, d'autre part [Birkeland2011] [Rapin2002]. Ces deux échelles permettent d'évaluer la taille d'une avalanche soit, pour la première, en fonction de la taille du couloir ou de la pente où elle s'est déclenchée, soit, pour la seconde, en fonction de son potentiel de destruction.

En 2001, en France, une nouvelle échelle d'intensité est définie et s'applique à toutes les avalanches qui induisent des dommages. Elle classe les événements par rapport à leur intensité et sur la base d'événements connus par le passé [Rapin2002].

Aujourd'hui, l'échelle Européenne diffère légèrement des échelles nord-américaines tout en s'apparentant plutôt à l'échelle canadienne [Moner2013]. La taille d'une avalanche est donc, entre autre, définie par son potentiel de dégât, mais l'échelle renseigne aussi, en plus du potentiel de dommages, des indicateurs liés à la portée de l'avalanche et sa taille typique (en termes de longueur et volume) [EAWS2021a].

Au-delà de pouvoir classer les avalanches selon leur taille, un enjeu réside dans le fait de savoir estimer jusqu'où une avalanche peut s'étendre sur le terrain. Pour cela, différents modèles existent. Ces derniers font l'objet de la section suivante.

### 1.1.3 Modèles et algorithmes

Il existe dans la littérature de nombreux modèles qui cherchent à estimer les étendues maximales des avalanches. Ils se répartissent en deux catégories : les modèles empiriques (avec en particulier les modèles statistiques basés sur la topographie) et les modèles dynamiques, basés sur des lois physiques. Harbitz et al. donnent une présentation complète de ces deux types de modèles [Harbitz1998]. La lecture de [Jamieson2008] permet d'acquérir un aperçu des modèles dynamiques utilisés pour la cartographie des zones de danger.

Concernant les modèles statistiques nous pouvons citer le modèle *Alpha-Beta* (aussi appelé *méthode norvégienne*) issu des travaux de Lied et Bakkehøi [Lied1980] et le modèle *Runout Ratio* issu des travaux de McClung et Mears [McClung1991]. Ces deux modèles statistiques sont les deux modèles les plus couramment utilisés pour estimer la distance d'arrêt maximale des avalanches.

Les modèles dynamiques sont des simulations numériques d'avalanches, utilisées pour calculer leur emprise maximale. Ils s'appuient sur des lois physiques et sont calibrés pour reproduire des dépôts extrêmes observés ou statistiquement évalués.

Nous pouvons citer en particulier le modèle RAMMS, qui s'appuie sur deux rhéologies (Voellmy Salm et Random Kinetic Energy) pour prédire respectivement les vitesses maximales du flux ainsi que l'étendue et la distribution générale des dépôts [Christen2010]. Dans sa version plus récente et augmentée, le modèle RAMMS :EXTENDED permet à l'utilisateur de renseigner différents paramètres (tels que des valeurs de densité de la neige, de température ou encore d'humidité) afin de simuler des avalanches de neige poudreuse ou mouillée, deux types d'avalanches ayant des dynamiques différentes.

De même, le modèle SAMOS [Zwinger2003] [Samp12004], pour les avalanches de neige sèche, est un modèle utilisé en Autriche depuis 1999. Il a ensuite fait l'objet d'améliorations pour apparaître, en 2007, dans une nouvelle version : SAMOS-AT, décrite dans [Samp12009].

Ces deux modèles (RAMMS et SAMOS-AT) utilisent des approches différentes pour modéliser la formation et le mouvement des nuages de poudreuses, tandis que leurs modélisations du coeur de l'avalanche sont basées sur la même approche. Ces deux modèles dynamiques sont comparés dans [Schmidtnet2018].

Jamieson et al. [Jamieson2008] soulignent cependant les incertitudes qui persistent dans ces modèles et présentent les limitations de leur utilisation pour la cartographie des zones de danger d'avalanche. Ces modèles sont en effet nécessairement basés sur des simplifications et des incertitudes entachent leurs paramètres d'entrée.

En dehors des modèles visant à estimer les distances d'arrêt des avalanches, des algorithmes existent dans la littérature. Des algorithmes ont en effet été développés pour évaluer les zones de départ potentiel d'avalanches (PRA pour *Potential Release Areas*) [Bühler2018a]. Ces algorithmes s'appuient sur des paramètres topographiques (pentes, courbures, proximité des crêtes. . .) pour estimer les PRA, ces paramètres étant directement extraits de Modèles Numériques de Terrain (MNT) [Maggioni2002]. En 2016, Veitinger et al. proposent même une approche pour l'estimation des zones de départ d'avalanches de plaques qui se base sur une estimation du terrain hivernal [Veitinger2016a]. Sa particularité est donc d'inclure, dans l'approche, l'influence du manteau neigeux sur la modification locale de la topographie.

L'objectif des algorithmes de PRA est de permettre l'identification précise des zones de départ d'avalanche. Ainsi on pourra fournir une meilleure donnée d'entrée aux modèles dynamiques, et générer de meilleures estimations. Ces algorithmes s'inscrivent donc dans un processus global, qui combine algorithme de PRA et modèle dynamique, en vue d'obtenir des cartes d'estimation du danger [Bühler2018b]. Ce type de carte n'est pas le seul disponible dans le domaine de la gestion du risque d'avalanche et la section ci-dessous en présente les différents types existants.

### 1.1.4 Cartographie : événements historiques et aléas

Dans le domaine du risque d'avalanche, plusieurs types de cartes existent. On trouve d'une part les bases d'inventaires d'événements passés et d'autre part les cartes d'aléas, qui conduisent *in fine* aux zonages réglementaires.

D'abord, les cartes d'inventaires relatent des événements historiques. Ces données sont par exemple enregistrées en France dans les bases de données de la CLPA (Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche) ou encore de l'EPA (Enquête Permanente des Avalanches) [Bonney2010] [Ancy2006] [Escande2010].

Ensuite, les cartes d'aléas sont exploitées afin de construire des zonages réglementaires et des plans de prévention des risques [MEDDE2015]. Ces derniers permettent principalement la prise en compte des risques dans les règles d'urbanisme [Ancey2006]. Dans leur publication de 2001, Gruber et Margreth exploitent le cas de l'année 1999 en Suisse pour illustrer l'importance des cartographies du danger et en faire ressortir les limites [Gruber2001].

Enfin, de nombreuses cartes d'indication et d'estimation du danger existent. Elles sont issues des résultats de modèles numériques et d'algorithmes et ne sont pas basées sur des événements existants. De plus, elles sont souvent réalisées sur de grandes étendues. Nous pouvons premièrement parler du processus global et automatique qui vise à combiner algorithme de délimitation de la PRA et modèle dynamique. Cette automatisation part de la délimitation des zones de départ potentiel (grâce à un algorithme basé sur les caractéristiques du terrain, issues des Modèles Numériques de Terrain et leur gestion dans un Système d'Information Géographique (voir Section 1.1.3). Elle permet ensuite l'application d'un modèle dynamique (qui reçoit en entrée la PRA définie). Enfin, elle génère, au final, une cartographie à large échelle du danger (appelée LSHM pour *Large Scale Hazard Mapping*). La délimitation de la PRA, des informations de profondeur de neige et des simulations dynamiques sont donc combinées pour produire des cartes d'indication du danger d'avalanche sur une large région et pour différents scénarios afin d'obtenir des informations sur les espaces pouvant être affectés par des avalanches extrêmes [Bühler2018b]. Maggioni et al. en ont proposé une application à l'Italie [Maggioni2018].

Pour finir, nous pouvons citer la carte de Classification du Terrain Avalancheux de Harvey et al. [Harvey2018b]. Cette carte identifie, notamment pour la pratique du ski de randonnée, les lieux où les avalanches se produisent et où les skieurs sont susceptibles d'être menacés en dehors des zones raides [Harvey2018b]. Ces cartes résultent d'un calcul réalisé à l'aide du modèle RAMMS :EXTENDED (voir Section 1.1.3).

Au final, on considère ici des outils permettant un travail d'estimation du danger sur de grandes régions. De plus, dans les précédents exemples, on s'attache plutôt à définir des scénarios extrêmes et prendre en compte l'étendue maximale des avalanches, ce qui est particulièrement utile dans le cadre de la gestion du risque d'avalanche vis-à-vis des infrastructures et de l'urbanisme. Ceci est moins vrai dans le cadre de la gestion des risques vis-à-vis de la pratique des sports de montagne, c'est pourquoi Harvey et al. dans l'exemple ci-avant considèrent des avalanches de taille 3 selon l'échelle européenne des tailles d'avalanche, afin de chercher à représenter les avalanches accidentelles pouvant être déclenchées par les skieurs [Harvey2018b]. Dans le même ordre d'idée et en 2014 déjà, alors que les modélisations dynamiques sont souvent utilisées pour modéliser les avalanches de grande ampleur, Dreier et al. [Dreier2014] ont cherché à utiliser ces modèles pour décrire les avalanches de petites tailles et fréquentes.

Si la cartographie vise principalement à rendre compte des étendues pouvant être affectées par les avalanches, donc à estimer les zonages potentiellement soumis à un danger, la section suivante présente les aspects relevant de l'estimation et de la prévision du danger d'avalanche au cours du temps, variant selon les conditions.

### 1.1.5 Estimation du danger et prévision

Le Bulletin d'Estimation du Risque d'Avalanche (BERA) est un indicateur régional du niveau de danger en cours. Il communique d'une part un chiffre et d'autre part des informations textuelles décrivant la situation rencontrée. Ce chiffre est généralement appelé *niveau de danger* (en France, on trouve cependant le terme *indice de risque*, mais celui-ci est mal approprié ; dans la suite de nos travaux nous emploierons donc le terme *niveau de danger* pour désigner le chiffre du bulletin). On peut comprendre à la lecture de la littérature que les lecteurs du BERA se concentrent le plus souvent sur le niveau de danger uniquement, plutôt que sur les descriptions détaillées et informations rédigées concernant le type de problème d'avalanche attendu ou la structuration du manteau neigeux [Atkins2004] [Höller2018]. Cependant, l'agrégation des différentes informations que le

bulletin traduit en un chiffre seul est parfois discuté : il n'est pas toujours clair de comprendre comment tous les indicateurs considérés sont combinés [Schweizer2018].

Si l'agrégation des différentes informations à prendre en compte n'est pas standardisée, ni clairement établie et formalisée, les différents bulletins édités sont donc susceptibles de différer d'un centre de prévision à l'autre et même, d'un prévisionniste à un autre. Des études s'intéressent à la cohérence spatiale et aux biais dans les prévisions d'avalanches entre les différents bulletins, notamment en ce qui concerne le niveau de danger [Lazar2016] [Techel2018] [Techel2020a], mais les situations d'avalanche communiquées subissent les mêmes biais [Statham2018b]. À l'échelle des Alpes européennes, alors que tous les pays utilisent la même échelle (l'échelle européenne du danger d'avalanche [EAWS2021b]), et malgré la création en 2005 d'une matrice auxiliaire *Bavarian Matrix* (BM) pour unifier et harmoniser l'utilisation des niveaux de danger [Müller2016b], le danger prévu ne concorde pas systématiquement entre les différents pays (i.e., qu'il y a un manque de cohérence dans l'application du niveau de danger entre les prévisionnistes de différents pays) [Techel2018]. Même si les différences sont réduites, des incohérences (i.e., estimations différentes du niveau de danger) perdurent aussi au sein des pays et au sein des centres de prévisions. D'après ces auteurs, certains centres de prévisions utilisent d'ailleurs systématiquement des niveaux de danger plus bas (ou plus hauts) que leurs voisins.

Pour pallier ce type de problème, *AvalX* a été développée au Canada. Il s'agit d'une méthode qui fournit un processus standardisé de prévision et une harmonisation des bulletins [Statham2012]. De façon similaire, le bulletin suisse (pour un gain de temps de production du fait de sa traduction en quatre langues différentes) est basé sur l'utilisation d'un catalogue de phrases pré-définies pour décrire les situations [Winkler2013]. Cela génère, en outre, une harmonisation des bulletins suisses, réduisant les différences possibles d'un centre de prévision à l'autre et même d'un prévisionniste à l'autre. Si cela apporte de la cohérence dans les termes employés par les prévisionnistes (i.e., utilisation des mêmes termes prédéfinis), Hutter et al. (dans leur étude sur les prévisionnistes suisses travaillant en allemand) montrent que des incohérences persistent dans la communication des éléments clés du danger d'avalanche : les conditions extrêmes sont décrites de manière plus détaillée que les valeurs intermédiaires et certains termes sont utilisés à mauvais escient, voire ne sont pas du tout utilisés, par l'ensemble des prévisionnistes [Hutter2021].

En Amérique du Nord, en 2010, le CMAH (pour *Conceptual Model of Avalanche Hazard*) [Statham2010] a été introduit pour améliorer la transparence et la cohérence des bulletins d'avalanche. Ce modèle est décrit dans [Statham2018a]. Si les prévisionnistes se basent sur des indicateurs tous soumis à incertitude (les observations d'avalanches, le manteau neigeux, le temps, le terrain), le CMAH cherche à structurer l'évaluation du risque. Il fait cela autour de quatre principales questions et attache une grande importance aux différentes situations d'avalanche. D'après les auteurs, ce processus est transférable à toutes les opérations de prévisions des avalanches, quelle que soit l'échelle de temps ou d'espace. Cependant, d'après [Clark2019], le CMAH n'a pas de lien explicite au niveau de danger, ce qui laisse des incohérences dans les différents bulletins en Amérique du Nord puisque les prévisionnistes doivent faire appel à leur propre jugement pour choisir le niveau de danger final à inscrire sur le bulletin. Enfin, pour la raison identifiée ci-dessus, d'autres auteurs ont proposé une utilisation combinée de CMAH et BM dans un résultat nommé ADAM (pour *Avalanche Danger Assessment Matrix*, Matrice d'Évaluation du Danger d'Avalanche) [Müller2016a].

Si le BERA est une très bonne aide fournissant au lecteur une estimation du niveau de danger, il est limité dans le temps et dans l'espace. Des alternatives ont alors été proposées pour réaliser soi-même une estimation du niveau de danger en l'absence de bulletin. C'est en particulier le cas de *Dangerator*. *Dangerator* [Floyer2018] est un arbre décisionnel qui structure différents facteurs et combine des questions clés relatives aux conditions locales (surcharge, réchauffement, manteau neigeux, observations d'avalanches), dans le but d'évaluer le danger local. Cette méthode a été développée pour "*imiter les aspects importants du processus de prévision*" [Floyer2018] et communique alors en sortie un niveau de danger (modéré, considérable ou haut). De façon si-

miltaire, d'autres méthodes existent pour faire une évaluation personnelle du niveau de danger : *NivoCheck* [Munter2009], *EvalNivo* [ANENA2018], et d'autres encore comme par exemple la grille d'évaluation d'un risque local du SNGM<sup>1</sup> français.

L'estimation du risque d'avalanche pour l'établissement du bulletin est basée sur de nombreuses informations relatives à la neige, aux observations d'avalanches et aux conditions météorologiques. Ces données peuvent être rares, et difficiles à obtenir. Les services prévisionnistes ont donc recouru à des modèles numériques comme SNOWPACK et Crocus, des modèles permettant de simuler l'évolution du manteau neigeux tout au long de la saison. La prévision du risque d'avalanche se fait donc en partie à partir de profils de neige simulés [Bellaire2013].

En France, pour la prévision du risque d'avalanche du bulletin, une suite opérationnelle, nommée *chaîne SCM* (pour SAFRAN-Crocus-MEPRA), est appliquée [Coléou2009]. Cette chaîne permet de simuler l'évolution des principales caractéristiques du manteau neigeux dans un massif, pour différentes altitudes et orientations, à partir des conditions météorologiques prédominantes de ce massif.

La chaîne SCM [Durand1999] est constituée de trois modèles successifs : SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie) [Durand1993]; Crocus [Brun1989] [Brun1992], un modèle qui simule l'évolution du manteau neigeux à partir des données obtenues en sortie de SAFRAN; MEPRA (Modèle Expert d'Aide à la Prévision du Risque d'Avalanche) [Giraud1992], un système expert qui analyse la stabilité et fournit un diagnostic en termes de risques naturels et accidentels.

Comme présenté en Section 1.1.1, le transport de la neige par le vent est un phénomène influençant l'évolution du manteau neigeux. [Guyomarc'H2013] ont alors proposé l'intégration d'un schéma de transport éolien de la neige dans la chaîne opérationnelle de prévision du danger d'avalanches. La chaîne SCM devient alors SSCM pour SAFRAN-Sytron-Crocus-MEPRA, intégrant le modèle Sytron.

La chaîne SCM a aujourd'hui évolué pour devenir SAFRAN – SURFEX/ISBA-Crocus – MEPRA (S2M) [Lafayse2013] [Vernay2015] [Vionnet2012a]. Cette nouvelle chaîne permet une meilleure prise en compte des échanges thermiques entre le sol et la neige, ce qui permet, dans certaines situations de début de saison, une meilleure simulation du manteau neigeux ainsi que l'extension de l'usage de la chaîne à des massifs d'altitudes plus basses.

Une fois le niveau de danger de la situation en cours estimé, il peut être utilisé lors de la mise en œuvre de méthodes d'aide à la décision en terrain soumis au danger d'avalanche. Ces méthodes font l'objet de la section suivante.

### 1.1.6 Méthodes d'aide à la décision

Cette section traite de la gestion du risque d'avalanche dans le contexte de la pratique des sports de montagne puisque cette pratique est à l'origine de la grande majorité des accidents en France. Elle représente 95% des accidents d'avalanche, générant une trentaine de décès par an et un nombre encore plus élevé de victimes, emportées ou ensevelies.

Par ailleurs, la plupart du temps, ce sont les skieurs eux-mêmes qui déclenchent les avalanches qui les emportent [Jamieson1996] [Tremper2001] [Vontobel2013].

Puisque la plupart des accidents d'avalanches sont liés à la pratique des sports de montagne, le développement de méthodes d'aide à la décision joue un rôle important dans la gestion du risque. Contrairement au cas de la gestion du risque vis-à-vis des infrastructures, il n'est pas possible ici d'intervenir sur le danger. Les pratiquants peuvent donc seulement agir sur leur exposition et leur vulnérabilité pour réduire le risque. En effet, lorsqu'un élément exposé au danger se déplace, le risque auquel il s'expose change; ceci s'applique donc pour un groupe de skieurs en terrain avalancheux. C'est donc à travers leurs choix d'itinéraires que les pratiquants peuvent agir sur le

---

1. Syndicat National des Guides de Montagne

risque d'avalanche.

Dans ce contexte, de nombreuses méthodes d'aide à la décision ou méthodes de réduction des risques ont été développées à partir des années 1990 et l'avènement de la formule 3x3 de Munter [Munter2003]. La formule 3x3 cherche à mener une appréciation globale du danger d'avalanche sur la base de trois critères principaux : les conditions nivo-météorologiques, le terrain et les facteurs humains. Ces critères sont questionnés à trois reprises au cours de trois filtres géographiques successifs : régional, local et zonal, i.e., en phase de planification à distance du terrain, puis à l'arrivée sur le terrain et au niveau de la pente lors de chaque passage clef. Les informations sont alors de plus en plus précises et ces trois filtres successifs correspondent à des réévaluations qui permettent de préciser des prévisions ou suppositions précédemment établies voire de corriger des erreurs. Cette formule permet l'évaluation sur la base de laquelle des décisions pourront être prises. Sur le terrain, la décision est en effet une étape essentielle qui complète l'évaluation. Parmi les différentes méthodes proposées, certaines sont de véritables méthodes de réduction des risques, qui calculent un risque résiduel ou des valeurs de prévention (i.e. le nombre d'accidents passés qui pourraient être évités en utilisant la méthode), tandis que d'autres sont des méthodes d'aide à la décision sans réduction du risque au sens strict, mais qui aident les utilisateurs à structurer leur pensée.

D'après l'Association Canadienne des Avalanches (ACA), "*Les aides à la décision et à l'évaluation sont des outils de soutien particuliers qui aident spécifiquement les décideurs à combiner plusieurs observations et à produire une évaluation et/ou une décision en matière d'atténuation des risques.*" [ACA2015]. Une méthode de réduction des risques est une approche qui fournit des techniques et stratégies dont le rôle est d'identifier, évaluer et réduire le risque. En ce qui concerne la pratique des sports de montagne, il s'agit par conséquent de méthodes qui visent à réduire la probabilité d'être emporté par une avalanche (en agissant sur l'exposition) ainsi que les conséquences d'une possible avalanche (en agissant sur la vulnérabilité). Les méthodes d'aide à la décision cherchent donc à assister les utilisateurs dans leur prise de décision sur le terrain, les guidant à travers l'analyse de différents critères (qui peuvent être plus ou moins nombreux selon les méthodes) pour déterminer le risque auquel ils s'exposent. L'objectif est donc d'aider l'utilisateur à pratiquer son sport en terrain risqué de la façon la plus adaptée possible à la situation. Il s'agit alors de tenter de prendre les meilleures décisions possibles, souvent sur la base de critères simplifiés.

Il existe ainsi tout un ensemble de méthodes qui viennent en aide aux pratiquants pour évaluer la situation avalancheuse et prendre les décisions les plus sécuritaires possibles. Landrø et al. présentent une revue de littérature très récente sur les méthodes d'aide à la décision, en abordant en particulier le point de vue de leur utilisation par les experts [Landrø2020a].

Landrø et al. considèrent neuf méthodes existantes, auxquelles s'ajoutent en réalité quatre autres méthodes. Ainsi, ce ne sont pas moins de treize méthodes qui sont à disposition des pratiquants des sports de montagne de diverses régions du monde. Après une courte synthèse (voir Section 1.1.7), la section suivante (voir Section 1.2) s'attachera à détailler la présentation, l'analyse et la description de cet univers de méthodes d'aide à la décision. Nous cherchons d'abord à comprendre les origines et évolutions des différentes méthodes (Section 1.2.1), puis davantage à les comparer, tant dans leurs façons d'être (Section 1.2.2) que dans leurs performances (Section 1.2.3).

### 1.1.7 Synthèse

La complexité du phénomène naturel qu'est l'avalanche est mise en avant par la Section 1.1.1 qui souligne les interactions unissant les différents facteurs contributeurs des avalanches. Notons que le Chapitre 2 illustrera encore davantage cette complexité en explicitant et décomposant les cinq critères principaux intervenant dans le déclenchement des avalanches. Nous pouvons noter que certains facteurs contributeurs intervenant dans le déclenchement des avalanches, considérés

comme des critères dans les différentes méthodes d'aide à la décision, ne sont pas clairement définis. En particulier, aucun travail ne porte sur la caractérisation des observations d'avalanches récentes, critère pourtant essentiel, étant le seul critère tangible qui prouve la présence d'une couche fragile active dans le manteau neigeux.

Ensuite, la Section 1.1.2 montre en particulier que plusieurs échelles de tailles d'avalanches coexistent et traduisent différents points de vue. Elles permettent la caractérisation de l'avalanche selon son potentiel de destruction ou selon ses dimensions par rapport au couloir d'avalanche où elle se produit.

La Section 1.1.3 donne une première idée des modèles et algorithmes existants pour estimer les étendues maximales des avalanches. Cependant des incertitudes persistent dans ces modèles et limitent leur utilisation, notamment dans le cadre de traitements en temps-réel ou pour l'estimation du risque d'avalanche sur le terrain dans la pratique du ski de randonnée. Des améliorations sont donc nécessaires, dans ce cadre, pour améliorer l'estimation de la distance d'arrêt des avalanches. La Section 1.1.4 fait état des cartes existantes dans le domaine de la gestion du risque d'avalanche et présente en particulier la CLPA. Cette dernière permet de conserver la mémoire des événements passés, élément indispensable à la gestion actuelle du risque d'avalanche afin d'éviter de reproduire continuellement les mêmes erreurs, en continuant de fréquenter les zones les plus exposées. Le BERA est ensuite présenté dans la Section 1.1.5 puisqu'il s'agit d'un élément incontournable de la prévision du risque d'avalanche en France et dans différentes zones montagneuses du monde. Cependant, ses premières limites sont déjà mises en évidence. Nous pouvons citer les principales d'entre elles. D'abord, le niveau de danger correspond à un indicateur du risque moyen régional et non à un risque maximum local ce qui serait plus adapté dans notre contexte, pour une gestion du risque au niveau de la pente. Ensuite, l'agrégation de différents paramètres en un niveau de risque final n'est pas clairement explicitée et sa rédaction est soumise à des biais humains. Enfin, malgré l'émergence de quelques initiatives, le bulletin d'avalanche (tant en ce qui concerne son niveau de danger que ses informations textuelles) n'est ni harmonisé ni standardisé entre les différentes régions du monde, ni même au sein d'un unique pays ; il n'en résulte donc pas une base solide sur laquelle peuvent s'appuyer les différentes méthodes d'aide à la décision existantes.

La dernière section (Section 1.1.6) présente et analyse les méthodes d'aide à la décision qui ont émergé depuis les années 1990 pour tenter de réduire le nombre d'accidents affectant les pratiquants de sports de montagne. Si de nombreuses méthodes ont émergé, aucune ne fait aujourd'hui consensus. La section suivante présente plus en détails cet univers de méthodes, qui joue un rôle essentiel auprès des pratiquants de ski de randonnée, pour les assister dans leur choix d'itinéraires afin de gérer leur exposition et ainsi minimiser les risques encourus.

## 1.2 Ski de montagne : un univers de méthodes d'aide à la décision

Dans cette section, nous considérons et comparons toutes les méthodes d'aide à la décision existantes, c'est-à-dire les neuf méthodes considérées par Landrø et al. en 2020 [Landrø2020a] [Landrø2020b] ainsi que quatre autres méthodes existantes. L'objectif principal est de fournir une vue d'ensemble des treize méthodes existantes à travers un état de l'art de la littérature relative aux méthodes d'aide à la décision dans la pratique du ski de randonnée en terrain soumis au danger d'avalanche. Notons que la formule 3x3 [Munter2003] n'est pas incluse dans cette comparaison puisqu'il s'agit davantage d'une approche qui structure le processus de décision que d'une véritable méthode d'aide à la décision. La formule 3x3 doit plutôt être considérée comme le point de départ des méthodes d'aide à la décision dans le domaine de la gestion du risque d'avalanche.

### 1.2.1 Vue d'ensemble et évolutions

Dans cette section, nous détaillons la chronologie d'apparition des méthodes, afin d'identifier de quelle(s) méthode(s) existante(s) chaque nouvelle s'est inspirée. Pour cela, nous présentons



et leurs orientations. Pour chaque niveau de danger, la MRE indique une inclinaison de pente à ne pas dépasser ( $\leq 39^\circ$  par niveau de danger 2,  $\leq 34^\circ$  par niveau de danger 3,  $\leq 29^\circ$  par niveau de danger 4).

**Stop or Go (SoG)** La méthode *Stop or Go* (SoG) [Larcher1999] [Larcher2001] est apparue en Autriche en 1999. Elle est composée de deux étapes (*check 1* et *check 2*). L'étape *check 1*, qui donne une inclinaison de pente à ne pas dépasser en fonction du niveau de danger du BERA, est directement héritée de la MRE. La deuxième étape, *check 2*, permet quant à elle l'observation de facteurs nivo-météorologiques. Elle apporte donc une nouveauté comparée à la MRE grâce à la prise en compte d'informations relatives au manteau neigeux : la quantité de neige fraîche, la quantité de neige transportée par le vent, la présence de signes d'instabilité ou l'activité avalancheuse récente et l'humidification du manteau neigeux.

**SnowCard (SC)** La méthode *SnowCard* (SC) [Engler2001], développée en 2001 en Allemagne, est elle aussi héritée de la MRE et combine le niveau de danger à l'angle de la pente.

Comme SoG, SC est complétée par des critères additionnels (dans une liste appelée *Faktorencheck*). Ces critères doivent être pris en compte pour affiner la prise de décision. Ainsi, les deux méthodes (SoG et SC) ont des concepts similaires et proviennent toutes les deux de la MRE qu'elles complètent en considérant le manteau neigeux à travers un certain nombre de critères relatifs à ce dernier. Ces deux méthodes requièrent donc plus de connaissances mais permettent aux utilisateurs plus expérimentés d'affiner leur prise de décision.

SC présente cependant un développement supplémentaire : cette méthode donne pour la première fois une représentation graphique de la combinaison entre le niveau de danger et la pente. Elle distingue même deux cas (les cas *favorable* et *défavorable*) selon que les pentes appartiennent ou non aux orientations et altitudes identifiées dans le BERA comme "particulièrement affectées". De plus, cette méthode donne un gradient de couleur qui ajoute une gradation du risque qui n'est pas présente dans la MRE.

Enfin, comme évoqué ci-avant, *Faktorencheck* couvre les conditions relatives au manteau neigeux. Cela consiste en 5 critères : dernière période de précipitations neigeuses, vent, température, ancienne surface de neige et épaisseur de l'ancienne neige. *Faktorencheck* apporte une nouvelle évolution par rapport à la méthode SoG. Elle donne en effet des règles de combinaison de ces critères (une fois évalués) et suggère une utilisation combinée avec la représentation graphique de SC.

**Méthode de Réduction Graphique (MRG)** Comme la SC, la *Méthode de Réduction Graphique* (MRG) [Harvey2002] [Harvey2009a], est une représentation graphique de la MRE. Une fois encore, la méthode propose une gradation du risque à travers un gradient de couleur, mais celui-ci est moins raffiné que celui proposé dans la SC : il correspond en effet à une valeur constante de  $5^\circ$ . Comme la SC, son interprétation n'est pas clairement définie et est donc laissée à l'utilisateur à travers la prise en compte d'autres facteurs (ceux de la formule 3x3) qui permettent d'augmenter ou diminuer le niveau de risque évalué.

**After Ski Method (ASM) ou Méthode de Réduction pour Débutant** La méthode *After Ski Method* (ASM), élaborée en Norvège en 2008 [Brattlien2008], parfois appelée *Méthode de Réduction pour Débutant* dans la littérature, est la dernière méthode directement héritée de la MRE. Puisqu'elle est dédiée aux débutants, elle apporte pour chaque niveau de danger une marge de sécurité additionnelle en réduisant de  $5^\circ$  l'angle maximum de la pente à ne pas dépasser. Cette marge de sécurité a été reprise par le SLF en 2009 qui a ajouté cette limite à la représentation graphique de la MRG en la matérialisant par une ligne pointillée [Harvey2009b] et est toujours présente dans leur représentation de 2018 [Harvey2018c].

**Méthode de Réduction Quantitative (MRQ)** Enfin, la *Méthode de Réduction Quantitative* (MRQ) [Schmudlach2018], née d'une collaboration entre la Suisse et la Norvège en 2018, est à la fois une évolution de la MRP et de l'ATP (ATP étant une partie de l'*Avaluator*, voir le paragraphe dédié à l'*Avaluator* dans la section suivante, relative aux méthodes issues d'une autre influence). La MRQ combine en effet un indicateur de danger et un indicateur de terrain, ce qui fait d'elle une héritière des Méthodes de Réduction de Munter qui combinent le niveau de danger du bulletin à l'inclinaison des pentes. Cependant, ces deux indicateurs apparaissent ici dans une version plus complexe. L'indicateur de danger prend en compte à la fois le niveau de danger du BERA et les orientations et altitudes indiquées dans le BERA comme particulièrement affectées, pour en faire un indicateur continu. L'indicateur de terrain décrit si le terrain est typique ou non d'un terrain avalancheux. Cette approche est similaire à l'ATES [Statham2006] sur laquelle la méthode *Avaluator* est basée ; cependant, seulement trois des onze critères de l'ATES sont inclus et deux nouveaux critères sont ajoutés (*taille de la pente* et *proximité des crêtes*). Cette approche est basée sur de précédents travaux présentés dans [Schmudlach2016b].

Selon les auteurs, l'objectif de la MRQ est de compenser le fait que les méthodes de réduction conventionnelles (ASM, MRG) négligent l'utilisation du terrain par les skieurs et ne peuvent donc pas représenter le risque, puisqu'elles sont uniquement basées sur des données d'accidents [Schmudlach2018]. Pour concevoir leur méthode, l'utilisation du terrain par les pratiquants, donc la fréquentation du terrain, a été prise en compte (grâce à l'exploitation de traces GPS). Les développeurs de la MRQ considèrent ainsi les éléments vulnérables et par conséquent évaluent un risque et non un danger. Il s'agit de la principale contribution de la méthode.

De plus, la MRQ est la première méthode à être entièrement automatisée. Elle nécessite pour cela une plateforme informatique pour être implémentée. Cette méthode est aujourd'hui utilisée dans l'outil Skitourenguru [Schmudlach2016a] [Skitourenguru2019].

### Méthodes issues d'une autre influence

Les méthodes décrites dans cette section n'émanent pas des Méthodes de Réduction de Munter (décrites dans la section précédente), même si certaines d'entre elles montrent de fortes similitudes. Cette section présente trois méthodes.

**Méthode des indices évidents (OCM, pour Obvious Clues Method)** La *Méthode des indices évidents* (OCM) [McCammon2006a], développée depuis 2000 [McCammon2000] en Amérique du Nord, est une initiative qui diffère des Méthodes de Réduction de Munter. Elle trouve son origine suite à l'observation que "*la plupart des victimes d'avalanche semblent avoir ignoré des signes évidents d'instabilité*" [McCammon2004a], observation qui avait déjà été mise en évidence auparavant par [Jamieson1996] [Atkins2000] [Tremper2001]. Cette méthode repose sur le fait de compter le nombre d'indicateurs de danger associés à une pente donnée. Il s'agit donc d'évaluer la quantité d'indices observés parmi sept indices évidents qui sont depuis longtemps identifiés comme des signes non équivoques de danger d'avalanche [McCammon2004b] [McCammon2006a]. Selon le nombre d'indices observés, l'utilisateur devra être particulièrement vigilant, voire même considérer un itinéraire alternatif pour réduire les risques. En s'appuyant sur le nombre d'indices présents dans des accidents d'avalanches passés aux États-Unis, la méthode recommande en effet, à partir d'un seuil de quatre indices, de trouver un itinéraire plus sécurisé [McCammon2006a].

L'auteur alerte par contre sur les limites de la méthode, sujette aux facteurs humains. Pour cette raison, il établit très rapidement six pièges heuristiques [McCammon2004a] qui sont liés aux facteurs humains. Ces biais sont importants puisqu'ils conduisent les gens à se convaincre "*que les conditions ne sont pas si mauvaises*" ou "*qu'ils ont les compétences pour atténuer le danger*". De même, connaissances, compétences et expérience ne sont pas gage de sécurité [McCammon2006a]. Les six pièges heuristiques qu'il a établis (l'habitude, le désir de séduction, l'obs-

tion, l'aura de l'expert, l'itinéraire et la sensation de rareté, ainsi que le positionnement social) viennent s'ajouter aux sept indices évidents et ont été récemment repris par l'institut américain sur les avalanches [AAI2020]. Bien que ce ne soit pas une partie intégrante d'OCM, ces six pièges sont souvent discutés par McCammon en parallèle de sa méthode. Cependant, ils sont seulement mentionnés sans être associés à une approche qui aide les utilisateurs à gérer ces biais humains. Il s'agit quoi qu'il en soit de la première énumération de facteurs humains qui complète la formule  $3 \times 3$ .

OCM est donc une méthode qui permet aux utilisateurs d'éviter le danger sur la base d'indices simples. Cette méthode a ensuite continué de faire l'objet d'études jusqu'à ce qu'elle soit intégrée dans l'Avaluator présenté ci-dessous.

**Avaluator (Av)** L'*Avaluator* (Av) est une méthode d'aide à la décision créée en 2006 au Canada [Haegeli2006] [Mccammon2006b]. Il s'agit de la première méthode nord-américaine qui tente de fournir une méthode d'aide à la décision proche de ce qui existe en Europe après avoir identifié des différences (en termes de climats, de BERA et de cartes topographiques) entre les deux continents. Cette méthode est composée de deux parties appelées *Avaluator Trip Planner* (ATP) d'une part, et *Obvious Clues* (OC) d'autre part. Si la MRE combine le niveau de danger et l'angle de la pente, ATP combine le niveau de danger avec une estimation de l'exposition du terrain aux avalanches. Ce nouveau critère correspond à une évaluation plus complète du terrain, basée sur l'échelle d'exposition du terrain aux avalanches (ATES pour *Avalanche Terrain Exposure Scale*) [Statham2006] (précédemment présentée en Section 1.1.1). Ainsi, à travers l'ATP, Av est la première méthode qui prend en compte le terrain de façon plus complète.

Ensuite, d'après Haegeli et al. : "*à mesure que le terrain devient plus complexe, le besoin de gérer le risque d'avalanche à des échelles plus petites augmente*" [Haegeli2006]. La deuxième partie de l'Av, OC, est développée afin de gérer ce changement d'échelle. Cette partie reprend exactement la méthode OCM décrite précédemment. L'intégration d'OCM dans l'Av permet de prendre en compte des informations relatives aux conditions nivo-météorologiques, ce qui est pour ainsi dire la même idée que le check 2 de SoG : cette réévaluation du danger local à travers des signes de danger observables rend possible le fait de ne pas baser sa décision seulement sur le niveau de danger indiqué par le BERA.

La description donnée ci-dessus correspond à la version 1 de l'Avaluator (Av1). En 2010, une deuxième version de l'Avaluator a été développée (Av2). Dans cette seconde version, la partie OC de l'Av évolue pour devenir *Slope evaluation*, soit l'évaluation de la pente [Haegeli2010]. Le principe reste alors le même (i.e. évaluer la présence ou l'absence d'indices, à un niveau local : celui de la pente), mais le nombre d'indices passe de sept à dix et ces derniers sont séparés en deux catégories (les indices relatifs aux conditions avalancheuses et les indices relatifs aux caractéristiques du terrain). Une représentation graphique combine ensuite le nombre d'indices obtenus dans chaque catégorie pour donner un niveau de prudence recommandé par la méthode sur la base du nombre d'indices identifiés.

**Démarche CRISTAL (CRISTAL), initialement Méthode de Vigilance Encadrée (BVM pour Bounded Vigilance Method)** La *Méthode de Vigilance Encadrée* (BVM) est apparue en 2012 [Duclos2012]. Cette méthode est avant tout dérivée du Modèle de Vigilance Encadrée (*Bounded Vigilance Model*), proposé à l'origine aux États-Unis en 2009 [McCammon2009a]. Le modèle de vigilance encadrée a pour but d'aider l'utilisateur à avoir conscience de la situation et donc réduire l'effet de surprise [McCammon2009a]. Dès 2010, Duclos a repris cette approche et a proposé ensuite quatre modes de vigilance graduels associés à des comportements appropriés à adopter sur le terrain. Ces quatre modes de vigilance (*Détendu*, *Méfiant*, *Alerté* et *Hasardeux*) sont les fondations de BVM [Duclos2012]. BVM a donc en commun avec OCM qu'elle repose sur un nombre réduit de critères que Duclos caractérise de *simples*, *mesurables* et *discutables* [Duclos2012]. Six indicateurs de danger doivent être analysés en priorité pour déterminer parmi les quatre modes

de vigilance lequel est le plus approprié à la situation. Ces six critères (que Duclos appelle *paramètres* dans le cadre de BVM) sont basés sur des travaux antérieurs [Duclos1998] [McCammon2006a] [McCammon2009a]. De façon similaire à OCM, BVM a ainsi pour but de rendre les utilisateurs conscients de la situation, sur la base d'indicateurs tangibles. BVM a donc aussi pour objectif de réduire l'effet de surprise afin de sélectionner le mode de vigilance adapté à la situation. En 2012, des seuils et des valeurs ont été proposés pour estimer les critères [Duclos2012]. Ils ont ensuite été considérés comme trop simplistes par Duclos, qui a décidé de revenir, en 2018, à une version qualitative des six paramètres de BVM, dans l'attente d'un travail de formalisation plus précis. Pour finir, en 2020, la méthode a pris le nom de *démarche CRISTAL* (CRISTAL).

Ainsi, à partir de signes identifiés de danger (qui sont le résultat d'une analyse conduite sur les six paramètres de CRISTAL relatifs au terrain et aux conditions nivo-météorologiques), les utilisateurs déterminent si aucune avalanche n'est possible dans le secteur envisagé (mode *Détendu*), si une avalanche est possible à proximité (mode *Méfiant*) ou sur l'itinéraire qu'ils envisagent, et la taille attendue de cette éventuelle avalanche (mode *Alerté* voire même *Hasardeux*).

Enfin, en lien avec les quatre modes de vigilance, CRISTAL apporte un élément significatif comparé aux autres méthodes : elle fournit, lors de la phase de prise de décision, des choix concrets qui sont cohérents avec l'analyse effectuée. Les quatre modes de vigilance permettent en effet de mener une analyse conduisant ensuite à la décision sur le terrain. En fonction du mode de vigilance obtenu, l'utilisateur se questionnera sur les possibilités qu'il a d'éviter ou de réduire le risque. Selon son analyse, il conservera le niveau de vigilance estimé par rapport à la situation détectée ou l'aggraverà au vu de sa propre situation et sa capacité à agir sur le terrain. Il pourra ainsi décider du comportement à adopter par rapport à ce mode de vigilance qui lui aura permis d'être conscient de la situation (liée à la fois au danger objectif détecté par les six paramètres à surveiller sur le terrain et au risque issu de sa propre situation et sa capacité d'action). La démarche conseille donc l'utilisateur, lors de la phase de décision, d'éviter le danger, de réduire le risque ou encore de changer de projet en fonction du mode de vigilance obtenu et de son analyse. Ainsi, CRISTAL rend la phase de décision plus explicite que le font les autres méthodes. Ces dernières en effet proposent seulement des choix du type *oui / non* et parfois *incertain*.

### Méthodes issues d'initiatives isolées

Les méthodes décrites dans cette section résultent d'initiatives qui n'ont pas été générées en connexion avec ou sur la base de méthodes pré-existantes. Cela concerne trois méthodes parmi les méthodes existantes.

**Systematic Snow-cover Diagnosis (SSD)** La méthode *Systematic Snow-cover Diagnosis* (SSD) [Kronthaler2006] [Kronthaler2013] [Kronthaler2014] [Kronthaler2019] ne présente aucun lien avec les Méthodes de réduction de Munter qui l'ont précédée. Elle trouve ses origines en 1998 avec le Service Bavarois d'Alerte d'Avalanche et a ensuite été affinée au cours du temps. Ce service souhaitait en effet développer une "*approche systématique pour l'observation du manteau neigeux et l'évaluation du danger d'avalanche*" [Kronthaler2013]. Cette méthode a pour but de réaliser un diagnostic du manteau neigeux et est dédiée aux autorités locales dans le domaine des avalanches ainsi qu'aux pratiquants des sports de montagne. Puisqu'elle est basée sur des observations de terrain et sur un profil simplifié du manteau neigeux (aussi appelé *Small Block Test*) [Kronthaler2006], elle est la première méthode qui repose sur l'angle de la pente et des caractéristiques locales du manteau neigeux sans aucune utilisation du BERA.

**NivoTest (NT)** Le *NivoTest* (NT) [Bolognesi2000] a été développé initialement en 1999. Cette méthode diffère elle aussi des deux familles de méthodes précédentes puisqu'elle ne repose pas sur le BERA, mais cherche plutôt à le compléter grâce à une analyse multicritères locale conduite

à travers une liste de questions. Cette liste de questions vise à prendre en compte le manteau neigeux à travers des observations nivo-météorologiques plutôt qu'à travers le niveau de danger du BERA. Cette analyse multicritères est basée sur trois grandes catégories de facteurs : les facteurs nivo-météorologiques, les facteurs topographiques et les facteurs humains. NT est la première méthode qui prend véritablement en considération les facteurs humains. Elle est ainsi parfaitement en accord avec la formule 3x3 et avec l'affirmation de Schweizer et al. qui indiquent que l'avalanche est le résultat de l'interaction complexe entre le terrain, le manteau neigeux et les conditions météorologiques [Schweizer2003].

Le NT a ensuite évolué au cours du temps. En 2012, la seconde version du NT apparaît et en complète la première version grâce à la prise en compte de facteurs favorables. Ceux-ci sont pris en considération à travers une seconde liste de questions. La prise en compte de facteurs favorables dans l'évaluation rend possible une réduction du niveau de risque évalué. De plus, dans la phase de diagnostic, la situation estimée peut être comparée au niveau de danger du BERA, permettant ainsi aux utilisateurs d'affiner le diagnostic. Cependant, le bulletin d'avalanche est seulement pris en compte dans la phase de diagnostic mais jamais durant les phases d'évaluation, ce qui distingue le NT de la plupart des méthodes.

Dans sa dernière version, le NT est maintenant implémenté dans une application pour appareils mobiles [Météorisk2018].

**To Go or Not To Go (TGoNTG), aussi appelée Décider dans la pente** Pour finir, la méthode *To Go or Not To Go* (TGoNTG), créée en 2018 [Harvey2018a], est une méthode sans compromis (i.e. de type "tout-ou-rien") car le résultat final de l'évaluation détermine strictement si l'utilisateur peut skier ou non la pente considérée. Elle définit un processus systématique de réflexion selon trois étapes d'évaluation qui permettent d'analyser la probabilité de déclenchement, les conséquences d'être emporté et le comportement des skieurs (i.e., les mesures de réduction du risque prises) [Harvey2018a]. Ainsi, comme le NT et à l'inverse de la plupart des autres méthodes, TGoNTG ne repose pas directement sur le niveau de danger du BERA [Harvey2018a].

### 1.2.2 Étude comparative basée sur quatre critères d'analyse

Cette section compare les 13 méthodes existantes à travers une étude conduite sur quatre critères d'analyse. Le premier critère utilisé pour comparer les méthodes (le critère *Vue d'ensemble de la situation*) permet d'analyser si les méthodes fournissent aux utilisateurs une vue globale de la situation. Ceci est étudié en analysant les différents critères, liés aux conditions nivo-météorologiques, au terrain et au facteur humain, qui sont utilisés dans chaque méthode. Le deuxième (le critère *Utilisation dans les différentes phases d'une randonnée à ski*) cherche à évaluer durant quelle phase d'une randonnée à ski les méthodes peuvent être appliquées (lors de la phase de planification, à l'arrivée sur le terrain ou aux passages clés). Ce critère analyse si les méthodes ne peuvent être utilisées que dans l'une des phases ou si, au contraire, elles sont dédiées à plusieurs phases, permettant éventuellement de corriger les résultats précédemment obtenus. Ensuite, les méthodes peuvent être développées sur la base de statistiques et/ou de connaissances expertes ; c'est ce qui est analysé au travers du troisième critère (le critère *Type de méthode*). Enfin, le quatrième et dernier critère de comparaison est en lien avec la flexibilité des méthodes, c'est-à-dire qu'il cherche à estimer, dans un résultat nuancé, si les méthodes laissent des marges de manœuvre aux utilisateurs ou si, à l'opposé, elles sont totalement contraintes. De plus, certaines méthodes, au-delà d'être flexibles, peuvent devenir subjectives lorsqu'elles laissent aux utilisateurs trop de liberté, d'interprétation, ou de jugement personnel, ou encore lorsque trop peu de cadre et de directives concrètes leurs sont donnés. C'est ce qui est présenté à travers le critère *Flexibilité et aspects subjectifs de la méthode*.

Chacun de ces critères (1. vue d'ensemble de la situation, 2. utilisation dans les différentes phases d'une randonnée à ski, 3. type de méthode, et 4. flexibilité et aspects subjectifs de la méthode)

permet d'évaluer, analyser et comparer les méthodes. Ils sont issus d'éléments clés discutés dans la littérature. L'étude complète est présentée en Annexe A. Seule une synthèse des quatre critères d'analyse est présentée dans ce chapitre.

### Synthèse des quatre critères d'analyse

L'annexe A permet une compréhension claire des quatre questions ci-dessous :

- À quel point les différentes méthodes donnent une image complète de la situation ?
- Les méthodes sont-elles applicables dans plusieurs phases d'une randonnée à ski ?
- Les méthodes sont-elles statistiques ou basées sur la connaissance experte ?
- À quel point les méthodes sont-elles flexibles ? C'est-à-dire, permettent-elles à l'utilisateur de prendre part à la méthode à travers de petites adaptations lui permettant de s'accorder à ses attentes et besoins, sans laisser trop de place aux aspects subjectifs qui peuvent engendrer de nombreux biais et réduire l'intérêt de l'existence d'une méthode ?

Cette section en donne une synthèse, illustrée par la Figure 1.2.

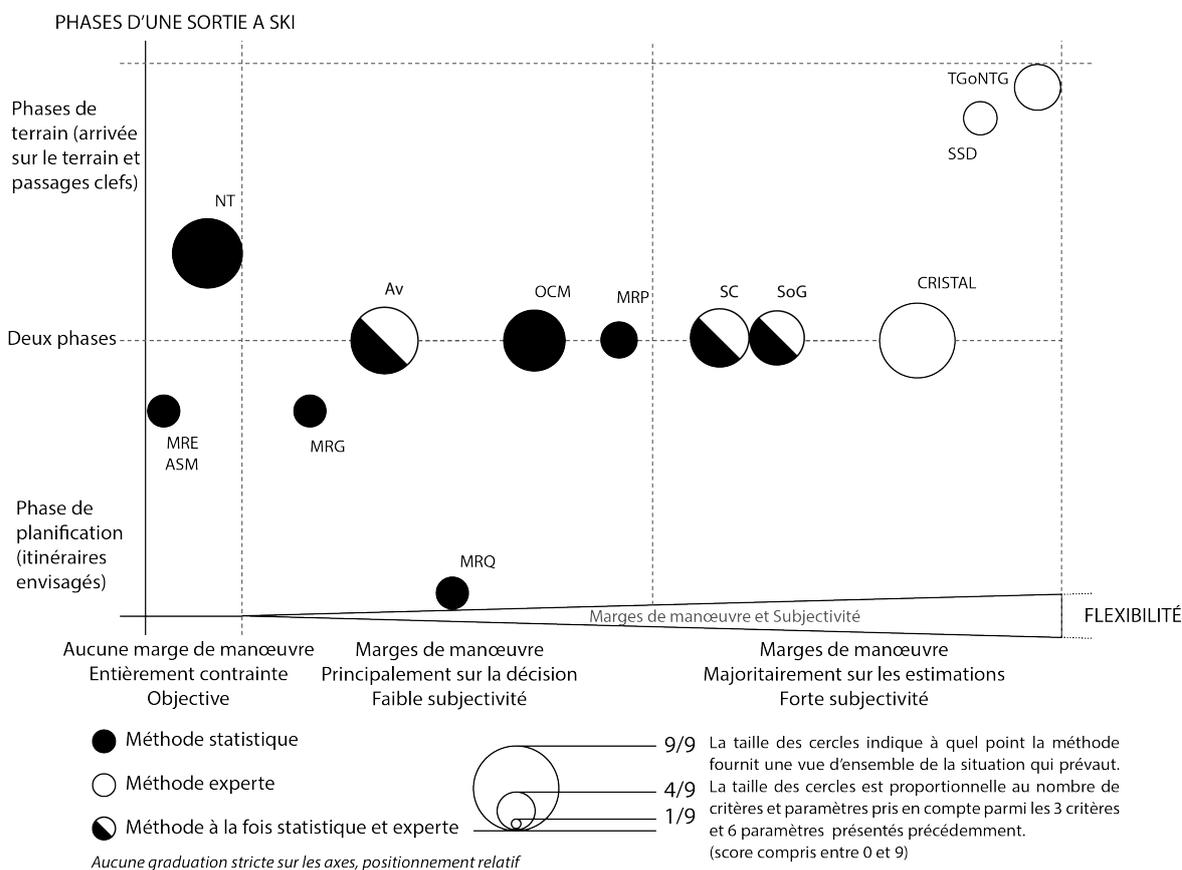


Figure 1.2 – Synthèse de l'analyse comparative des treize méthodes étudiées

D'abord, sur la base des trois critères de la formule 3x3 (*conditions ; terrain et facteur humain*) et des six critères principaux (*niveau de danger du bulletin ; inclinaison des pentes ; observations d'avalanches récentes ; augmentation de température, fonte ; surcharges nouvelles et couche fragile enfouie*) étudiés, les treize méthodes présentent d'importantes différences. En comptant le nombre de critères ( $\leq 9$ ) exploités par chaque méthode, nous avons établi un score pour chacune d'elles (voir Figure 1.2). Elles ont obtenus des scores allant de 4 (MRE, ASM, MRG, SSD et MRQ) à 9 (CRISTAL) sur 9. OCM, Av et NT sont elles aussi proches du score maximum, avec les scores respectifs de 7,5, de 8 et de 8,5.

Grâce à la Figure 1.2, nous pouvons remarquer que de manière générale, les méthodes statistiques sont davantage basées sur des règles et imposent plus de contraintes aux utilisateurs (ou leur laisse donc moins de marges de manoeuvre) que les méthodes expertes qui, à l'inverse, tendent parfois à laisser de la place à la subjectivité. Les méthodes expertes, par contre, semblent davantage correspondre au raisonnement des utilisateurs expérimentés qui est basé, d'après [Landrø2018] et [Landrø2020a], sur l'intuition, l'expérience et la connaissance. Un lien entre le type de méthode et la flexibilité semble donc émerger.

De plus, comme mentionné dans l'étude comparative, l'utilisation de statistiques comme base pour le développement des méthodes soulève un certain nombre de questions. Du fait de ces questions, une méthode ne semble pas devoir être construite entièrement sur la base de statistiques. L'avantage des méthodes expertes peut être remarqué, si elles sont justifiées et basées sur une connaissance partagée et acceptée.

Enfin, tandis que de nombreuses méthodes sont dédiées à la fois à la phase de préparation et à un usage sur le terrain, d'autres restent plutôt dédiées à l'une ou l'autre de ces phases. Bien sûr, la phase de planification d'une randonnée à ski est une phase importante, mais un "yes" ou "y aller" obtenu en phase de planification doit être remis en question sur le terrain, et en particulier lors des passages clés, selon le principe de la formule 3x3. Ainsi, une méthode d'aide à la décision semble devoir être dédiée à ces différentes phases (i.e. planification et décision sur le terrain), ce qui permet une constante ré-évaluation et remise en question des premières conclusions apportées par la méthode et satisfait le principe de la formule 3x3, formule davantage tolérante aux fautes et erreurs.

Après avoir comparé les différentes méthodes sur la base de leurs fondements, la section suivante cherche à en comparer leurs performances et illustre les biais qui rendent cette évaluation difficile.

### 1.2.3 Performance des méthodes et biais d'évaluation

Cette section vise à présenter les études qui comparent les performances de différentes méthodes. Cependant, les performances des méthodes et les valeurs de préventions établies peuvent être influencées par des paramètres extérieurs indépendants des méthodes : la localisation des cas étudiés, la gestion des valeurs manquantes dans les jeux de données, la considération des cas d'accident ou de non-accident, ou encore les conditions en cours (traduites par différents niveaux de danger du bulletin). Ces différents points sont discutés à travers les parties suivantes.

#### Méthodes de Réduction de Munter, OCM, SC et localisation géographique

Cette section présente trois études qui évaluent les performances des Méthodes de Réduction de Munter, de l'OCM et de la SC, mises en œuvre sur des données provenant d'accidents aux États-Unis [Mccammon2004b], en Norvège [Hallandvik2012], ainsi qu'en Autriche et Suisse [Behr2018]. Nous présentons ici leurs principales conclusions et proposons une synthèse et une mise en confrontation de ces trois résultats indépendants.

Dans leur étude, McCammon et Haegeli réalisent une comparaison entre cinq méthodes d'aide à la décision : MRP et MRE, NT, SC et OCM [Mccammon2004b]. Pour ce faire, ils se sont appuyés sur les données de 33 ans d'accidents d'avalanches aux États-Unis, entre 1972 et 2004.

D'après cette étude, trois critères doivent intervenir pour permettre l'évaluation de l'utilité globale des méthodes d'aide à la décision : la valeur de prévention, la mobilité et la facilité d'utilisation. Selon McCammon et Haegeli et sur la base de ces trois critères, la méthode des indices évidents serait le meilleur compromis, bien que chacune des méthodes évoquées (OCM, MRP, MRE, NT et SC) soit en mesure de prévenir la majeure partie des accidents passés considérés. D'après eux et selon leurs critères, ce sont les méthodes les plus simples qui sont les plus performantes. Le critère de mobilité tel qu'ils le définissent joue par contre nettement en défaveur des méthodes indiquant

un degré de pente à ne pas dépasser selon l'indice du BERA, notamment lorsque la méthode prend de grandes marges de sécurité.

En 2012, Hallandvik et al. ont mené une étude comparative sur les méthodes d'aide à la décision suivantes : MRP, MRE, ASM et OCM [Hallandvik2012]. Cette étude est basée sur des données d'accidents mortels en Norvège contenues dans 20 rapports depuis l'hiver 2005-2006. Un grand nombre d'accidents, parmi les accidents étudiés, auraient pu être évité par l'utilisation de ces méthodes. Ainsi, elles semblent capables de prévenir un certain nombre d'accidents mortels qui ont eu lieu en Norvège.

Notons que [Hallandvik2012] évaluent les méthodes en les appliquant au contexte norvégien. Ceci permet alors de questionner la transférabilité des méthodes (basées sur des statistiques et données alpines) à d'autres régions géographiques : les statistiques et données utilisées pour les développeurs sont-elles en effet toujours valides sous d'autres latitudes ? En ce qui concerne la MRP par exemple, les auteurs indiquent que "*Cette méthode a été mise au point pour être utilisée entre les latitudes 35° et 55° nord. La Norvège se situe entre 58° et 71° nord.*". Ils se demandent donc si cette méthode est adaptée à une utilisation en Norvège où les conditions sont différentes. En effet, compte tenu de la latitude de la Norvège, le soleil n'y a pas le même effet que dans les Alpes. Ainsi, le facteur de réduction lié à l'exposition n'aura donc pas le même effet que celui pour lequel il était prévu, dans les Alpes. Il est donc controversé de savoir si la MRP doit être utilisée en dehors des Alpes et en particulier en Norvège [Hallandvik2012].

Pour résumer, cette étude conclut à nouveau que chacune des méthodes étudiées est capable de prévenir un grand nombre d'accidents, mais elle soulève en revanche la question de la transférabilité des méthodes à des zones géographiques dont les climats et latitudes varient des conditions pour lesquelles les méthodes ont été initialement conçues. C'est le cas notamment à travers la MRP, dont le facteur de réduction lié à l'exposition par exemple a été choisi par rapport aux conditions d'ensoleillement des massifs Alpains.

Behr et Mersch ont publié en 2018 une étude évaluant la méthode SC [Behr2018]. Ils se sont pour cela basés sur les données d'accidents de 5 hivers (de 2013-2014 à 2017-2018) en Autriche et en Suisse.

Cette étude conclut que SC est elle aussi une méthode capable de prévenir un grand nombre d'accidents passés. De plus, s'ils préconisent l'utilisation de telles méthodes probabilistes, puisqu'elles permettent d'éviter de nombreux accidents, ils rappellent cependant qu'il ne s'agit que d'un élément de décision parmi d'autres, appartenant à une stratégie globale, dans laquelle ils soulignent par exemple le rôle joué par les connaissances et les compétences analytiques.

Pour résumer, les trois études évoquées ci-dessus en arrivent à la même conclusion, c'est-à-dire que les méthodes évoquées (MRP, MRE, ASM, OCM ou encore SC) permettraient d'éviter la plupart des accidents qui ont eu lieu par le passé. Si l'on ne considère pas les résultats de la MRP avec un risque résiduel choisi à 2 ou ceux d'OCM avec un nombre d'indices présents  $> 4$  (qui sont des utilisations particulièrement optimistes de ces méthodes, dépassant les recommandations de leurs créateurs), les valeurs de prévention sont en effet, quelles que soient les méthodes, a minima supérieures à 60% et peuvent atteindre jusqu'à 100% d'après l'étude norvégienne (voir Tableau 1.1). Rappelons que cela est déduit sur la base d'accidents survenus dans diverses parties du monde selon les études : États-Unis pour l'étude de [Mccammon2004b], Norvège pour l'étude de [Hallandvik2012] ou encore Autriche et Suisse pour l'étude de [Behr2018]. Ces méthodes seraient donc globalement efficaces pour ces différents pays, permettant d'éviter un grand nombre d'accidents.

Ajoutons que les deux premières évaluations s'accordent à dire que, parmi les méthodes étudiées, OCM est la plus performante (voir Tableau 1.1) [Mccammon2004b] [Hallandvik2012], dans le sens où elle aurait permis d'éviter le plus grand nombre d'accidents ayant eu lieu par le passé. Les valeurs estimées dans le cadre de l'étude norvégienne pour cette méthode sont plus faibles que celle menée sur les accidents des États-Unis ce qui est certainement dû à la façon de prendre en compte les données manquantes. Hallandvik et al. évoquent en effet à ce sujet que la valeur

de prévention est probablement sous-estimée dans leur étude. En revanche, on peut se demander comment McCammon et Haegeli ont traité les données manquantes dans leur étude car ils n'utilisent jamais plus de 280 accidents sur leur base de données qui en contient 751. Ceci permet donc de questionner la valeur de ces résultats. Aussi, notons que la seconde étude évoquée est basée sur un nombre très faible de données (20 accidents au maximum). La question de l'influence du traitement des données manquantes dans l'estimation des valeurs de prévention est abordée plus en détail dans la section suivante.

À l'inverse, l'étude de [Hallandvik2012] conduit à des valeurs de prévention plus hautes que celles estimées par [Mccammon2004b] en ce qui concerne les méthodes de réduction de Munter (voir Tableau 1.1). Ceci peut être dû à une différence de climat (notamment liée à la latitude de la Norvège qui diffère nettement des Alpes pour lesquelles la méthode a été conçue) ou d'un résultat potentiellement biaisé par le faible nombre de données disponibles pour l'étude ou encore du fait de la gestion des valeurs manquantes.

Lorsque McCammon et Haegeli analysent les méthodes sur des sous jeux de données séparant les accidents soumis à différents climats aux États-Unis, les valeurs de prévention associées aux massifs de climat maritime semblent comparables aux valeurs obtenues par Hallandvik et al. sur la Norvège. On constate cependant un écart significatif avec les valeurs obtenues pour les autres types de climats (intermédiaire et continental), les valeurs de prévention étant nettement plus faibles.

Enfin, les résultats communiqués par [Behr2018] concernant la SC semblent en accord avec ceux de [Mccammon2004b] sur le cas général des États-Unis (voir Tableau 1.1).

Bien que toutes les méthodes soient en mesure d'éviter un certain nombre d'accidents, leurs performances diffèrent selon le lieux et il semble donc difficile de généraliser à l'échelle mondiale des méthodes statistiques fondées sur des données régionales.

		[Mccammon2004b] (États-Unis)		[Hallandvik2012] (Norvège)		[Behr2018] (Autriche et Suisse)		
		Valeur de prévention	Données (nombre d'accidents)	Valeur de prévention	Données (nombre d'accidents)	Valeur de prévention	Données (nombre de décès)	
<b>ASM</b>		/		100 %	20	/		
<b>MRE</b>		80 ± 4 %	280	90 %	20	/		
<b>MRP</b>	0,5	82 ± 4 %	229	/		/		
	1	SF	/		93 %	14	/	
		AF	60 ± 5 %	229	79 %	14	/	
	2	36 ± 6 %	229	/		/		
<b>OCM</b>	< 3 indices	/		100 %	20	/		
	< 4 indices	92 ± 3 %	252	85 %	20	/		
	< 5 indices	77 ± 4 %	252	45 %	20	/		
<b>SC</b>	seuil J-O	86 ± 4 %	257	/		84 %	185	
	seuil O-R	75 ± 4 %	257	/		77 %	185	
<b>NT</b>		65 ± 8 %	115	/		/		

SF : Sans facteur de réduction lié à l'orientation ; AF : Avec facteur de réduction lié à l'orientation ; seuil J-O : limite fixée entre les zones jaune et orange (i.e. éviter les zones orange et rouge) du graphique de la SnowCard ; seuil O-R : limite fixée entre les zones orange et rouge (i.e. éviter la zone rouge) du graphique de la SnowCard

Tableau 1.1 – Tableau comparatif des valeurs de prévention estimées par les trois études présentées [Mccammon2004b] [Hallandvik2012] [Behr2018]

### Valeurs de prévention et gestion des données manquantes, cas de l'Avaluator

Comme introduit précédemment, Hallandvik et al. ont fait face dans leur étude à un certain nombre de données manquantes [Hallandvik2012]. Pour les réduire au maximum, en cas de manque d'informations sur la météorologie ou le terrain dans les rapports dont ils disposaient, des informations complémentaires ont été acquises, auprès de l'Institut Météorologique ou de l'agence nationale norvégienne de cartographie (Statens Kartverk). Malgré l'effort mis en œuvre pour combler les manques d'information, 16,8% des accidents pris en compte présentaient des données manquantes pour appliquer la méthode OCM (tandis qu'aucun cas n'était concerné par des données manquantes pour appliquer les deux autres méthodes étudiées dans leur étude). Ces manques sont donc susceptibles d'avoir affecté les valeurs de prévention établies pour OCM [Hallandvik2012]. Les valeurs de prévention établies dans cette étude pour OCM seraient donc potentiellement sous-évaluées. Ceci pourrait aussi expliquer les valeurs plus basses obtenues par Hallandvik et al. pour la méthode OCM (pour mémoire, voir Tableau 1.1).

Le cas de l'Av, largement discuté dans la littérature, permet d'illustrer davantage la question de l'influence de différents traitements des données manquantes dans l'estimation des valeurs de prévention estimées pour une méthode.

Une première étude a été conduite pour évaluer Av sur des données d'accidents d'avalanches [Mccammon2006b]. Les données utilisées proviennent de deux sources :

- un jeu de données canadien comprenant 697 incidents d'avalanches compris entre 1984 et 2005 ;
- un jeu de données d'accidents observés aux États-Unis entre 1972 et 2004 comprenant un total de 751 incidents.

L'analyse de l'ATP, basée sur seulement 203 accidents canadiens pour lesquels le niveau de danger et la valeur de ATEs ont pu être identifiés (i.e. seulement 203 accidents sur les 697 disponibles dans le jeu de données), montre qu'environ 75% des accidents reportés auraient pu être évités en réduisant les sorties aux zones vertes de l'Av (ou 36% en fréquentant les zones vertes et jaunes) [Mccammon2006b]. D'après la même étude, l'analyse de la partie OC de l'Av montre qu'environ 90% des accidents reportés auraient pu être évités en ne fréquentant que les zones vertes (i.e. avec la présence de deux indices au maximum) ou environ 47% dans le cas des zones verte et jaune combinées (i.e. jusqu'à quatre indices identifiés). Cette dernière analyse a été menée sur seulement 252 accidents des États-Unis pour lesquels les sept indices ont pu être évalués (les accidents canadiens manquaient d'informations). Cela pointe donc la difficulté d'obtenir des jeux de données sans données manquantes et soulève la question du traitement de ces données manquantes. En effet, d'autres études ont été conduites pour estimer les valeurs de prévention de l'Av et ont montré que différentes façons de gérer les données manquantes conduisaient à différents résultats. Uttl et al. pensent que les valeurs de prévention associées à l'Av par McCammon et Haegeli [Mccammon2006b] étaient surestimées du fait de leur traitement des données manquantes [Uttl2008] [Uttl2009a] [Uttl2009b]. Dans leur étude, à chaque fois que McCammon et Haegeli ne pouvaient pas estimer la présence ou l'absence d'un indice, ils supprimaient le cas correspondant de leur jeu de données, ce qui a conduit à la suppression de plus de 82% des cas de leur jeu de données initial [Uttl2008] [Uttl2009b]. Pourtant, d'après Uttl et al., l'hypothèse la plus raisonnable serait de considérer que l'absence d'information concernant un indice signifie absence de l'indice lui-même [Uttl2008] [Uttl2009b]. Ils ont plus tard déclaré dans [Uttl2009b] que les valeurs de prévention de l'Av n'étaient pas répliquables, puis affirmé qu'il en est de même pour Av2 [Uttl2012]. Ainsi, différents traitements des valeurs manquantes induisent différents biais sur les résultats, qui peuvent conduire à des erreurs.

### Comparaison ASM - MRE, cas d'accident, de non-accident et différences de conditions

L'étude du degré de sécurité apporté par l'ASM par rapport à la MRE permet de mettre en évidence les différences induites sur les valeurs de prévention lorsque sont considérés les cas d'accident seuls ou lorsque les cas de non-accident sont pris en compte. Cela permet aussi de mettre en évidence que les méthodes ne présentent pas les mêmes niveaux de performances par tous types de conditions, ce qui est mis en évidence ici grâce aux valeurs calculées par niveau de danger 2 ou 3.

En utilisant les 751 accidents de l'étude de McCammon et Haegeli [Mccammon2004b], Brattlien estime que 93% des accidents pourraient être évités en suivant les recommandations d'ASM, tandis que 80% le seraient en suivant la MRE [Brattlien2008]. Les marges entre les deux méthodes pour cette étude de cas sont donc de 13%.

Des statistiques plus récentes du SLF basées sur les pourcentages d'accidents qui ont résulté en un ou plusieurs décès dans les Alpes suisses en fonction de la pente [SLF2017] [SLF2018] [SLF2019] montrent un autre éclairage de ces marges de sécurité. D'après cette étude de cas :

- Par niveau de danger 2 (modéré), l'ASM permettrait d'éviter 82% d'accidents fatals tandis que seulement 43% seraient évités avec la MRE ; la marge entre les deux méthodes est donc de 39%.
- Par niveau de danger 3 (considérable), l'ASM permettrait d'éviter 97% d'accidents fatals tandis que seulement 82% seraient évités avec la MRE ; la marge entre les deux méthodes est donc de 15%.

La marge de sécurité entre les deux méthodes est donc très différente selon le niveau de danger. Par danger 2 en particulier (ce qui est le plus souvent le cas au cours d'une saison) la MRE permettrait d'éviter environ 2 accidents sur 5, ce qui est loin des 2 sur 3 initialement évoqués par Munter [Munter2003].

Ces deux études ne prennent en compte que des cas d'accidents d'avalanches (fatal ou non), sans prendre en compte l'ensemble des avalanches observées. Pour traiter cette situation, il est possible d'étudier un autre jeu de données provenant d'une étude du SLF [Vontobel2013]. Ces données indiquent l'angle de la pente de zones de départ de 139 avalanches déclenchées par des skieurs qui n'ont pas nécessairement résulté en un accident (i.e. enseveli ou tué des personnes). Ces données ont été enregistrées en Suisse entre les hivers 1999-2000 et 2009-2010. En exploitant ces données, il est possible de déduire que :

- Par niveau de danger 2 (modéré), l'ASM permettrait d'éviter 54% des avalanches déclenchées tandis que seulement 11,5% seraient évités avec la MRE ; la marge entre les deux méthodes est donc de 42,5%.
- Par niveau de danger 3 (considérable), l'ASM permettrait d'éviter 87% des avalanches déclenchées tandis que seulement 54% seraient évités avec la MRE ; la marge entre les deux méthodes est donc de 33%.

La marge de sécurité est donc une fois de plus différente. En particulier, par niveau de danger 2 et sans considérer seulement les cas d'accidents, mais en prenant en compte tous les cas d'avalanches déclenchées par les skieurs, même l'ASM ne permet d'éviter qu'une avalanche sur deux (et une sur trois par niveau de danger 3). Ces différentes statistiques permettent donc de fortement relativiser le niveau de sécurité offert par ces deux méthodes (ASM et MRE), en particulier par niveau de danger 2.

De plus, McCammon et Haegeli comparent aussi, dans leur étude de 2004, les méthodes MRP, MRE, NT, SC et OCM sur des sous jeux de données séparant les accidents qui ont eu lieu par différents niveaux de danger du BERA [Mccammon2004b]. Nous constatons dans les résultats qu'ils présentent que des écarts significatifs sont présents entre les différents niveaux de danger, et ce pour l'ensemble des méthodes étudiées. Par niveau de danger 1, toutes les méthodes sont associées à des valeurs de prévention de 0% lorsqu'elles sont utilisées avec les seuils préconisés par

leurs créateurs (i.e., 1 pour la MRP, seuil O-R pour SC et score  $\leq 23$  pour NT) et dans le cas d'un nombre d'indices  $\leq 4$  pour OCM. Par niveau de danger 2, les valeurs de prévention restent encore très faibles, allant de 25 à 40 % pour les seuils préconisés. Les valeurs de prévention augmentent ensuite peu à peu avec les niveaux de danger.

Il semble donc que les méthodes statistiques sont fortement dépendantes de l'indice du BERA et ne sont pas résilientes pour des niveaux de danger  $< 3$ .

En particulier, les méthodes dont les règles sont strictement basées sur la valeur du niveau de danger (telles que la MRE) sont particulièrement affectées par ce biais. À l'inverse, les méthodes pour lesquelles la prise en compte du niveau de danger du bulletin n'est qu'un indice parmi d'autres, comme c'est le cas dans OCM, sont moins affectées. Par risque 2 (limité), aux États-Unis, la MRE conduit en effet à une valeur de prévention de  $37 \pm 12$  % alors que OCM (avec un nombre d'indices inférieur ou égal à 3, ce qui correspond aux recommandations suggérées : adopter des précautions particulières lorsque trois indices ou plus sont présents) conduit pour ce même niveau de risque à une valeur de prévention de  $71 \pm 13$  %. Notons que par risque 1 (faible) ces écarts sont encore plus importants, la valeur de prévention permise par la MRE étant de 0 %, celle d'OCM atteignant quant à elle une valeur de prévention de  $63 \pm 34$  %. Ainsi, une méthode basée sur des indices évidents, incluant notamment les observations d'avalanches récentes (très bon indicateur du niveau de danger en cours, le seul illustrant la présence d'une couche fragile active dans le manteau neigeux sans remise en question possible), est plus résiliente. Dans l'étude de [Mccammon2004b], OCM est la seule à fournir une valeur de prévention significative par indice 2.

Pour les MR de Munter, seule ASM, qui prend des marges beaucoup plus importantes, permet d'obtenir un niveau de prévention acceptable. Cependant, les marges nécessaires à l'application de cette méthode la rendent très restrictive (en termes de possibilité de pratique, cf. critère de mobilité de [Mccammon2004b]) et n'est donc que rarement appliquée de manière générale.

### Synthèse

Ainsi, pour résumer cette Section 1.2.3, nous pouvons dire d'abord qu'il a été montré que toutes les méthodes permettent, dans une certaine mesure, de diminuer le nombre d'accidents, cela dans toutes les régions du monde, mais là encore, avec des performances pouvant être affectées. Cela soulève donc d'abord la question de la transférabilité des méthodes. Il est en effet difficile de généraliser à l'échelle mondiale des méthodes statistiques fondées sur des données régionales.

Ensuite, si toutes peuvent être utiles pour réduire le nombre d'accidents, nous identifions tout de même que les méthodes statistiques constituent, certes, un élément d'aide à la décision, mais doivent être complétées par des connaissances et compétences analytiques.

De plus, les performances de l'ensemble des méthodes sont variables en fonction des conditions, et donc selon le niveau de danger. Toutes les méthodes présentent des performances croissantes du niveau de danger 1 (faible) au niveau de danger 4 (élevé). Par ailleurs, pour les niveaux de danger les plus bas (1, faible et 2, limité), nous constatons que les méthodes statistiques fortement dépendantes de l'indice du BERA ne sont pas résilientes, tandis que les méthodes basées sur des indices évidents (et notamment les avalanches récentes observées) semblent donner des valeurs de prévention plus homogènes, atteignant déjà des valeurs de prévention acceptables (pour des niveaux de danger faibles).

Enfin, nous identifions que différents traitements des valeurs manquantes induisent différents biais sur les résultats. Ces biais peuvent alors conduire à des erreurs et à des valeurs de prévention mal évaluées et par conséquent erronées. Il en est de même selon les cas analysés (cas d'accidents fatals seuls, cas d'accidents uniquement, ou cas de non-accidents).

Ainsi, la localisation des situations étudiées, la gestion des valeurs manquantes dans les jeux de données, la considération des cas d'accidents ou de non-accidents, ou encore les conditions en cours rendent difficile la comparaison précise des méthodes. Il est en effet difficile d'obtenir

l'ensemble des informations nécessaires et les résultats sont influencés par la localisation des cas dans différentes régions.

S'il n'est finalement pas aisé de comparer précisément les méthodes entre elles puisque les jeux de données d'accidents utilisés par chacun des auteurs ne sont pas les mêmes, force est de constater que, malgré cet ensemble de méthodes et trente années d'évolutions, de nombreux accidents d'avalanches ont toujours lieu chaque année et aucune méthode ne fait consensus à l'heure actuelle. Le développement d'une nouvelle méthode plus performante ou l'amélioration des méthodes existantes se fait donc ressentir comme un besoin pour améliorer encore davantage la sécurité des pratiquants et professionnels de la montagne.

## 1.3 Émergence d'un besoin : recommandations et positionnement

Les études norvégiennes de Landrø et al. cherchent à traduire le point de vue des experts vis-à-vis des différentes méthodes existantes. Les experts s'appuieraient, pour la prise de décision, plutôt sur leur intuition, leur expérience ou des méthodes analytiques. Peu d'entre eux utilisent des systèmes de décision basés sur des règles. Les experts ne seraient donc que peu enclins à utiliser les méthodes existantes. Ils utilisent en effet des approches différentes, ne croient pas en les statistiques qu'elles utilisent, considèrent qu'elles combinent les mauvais facteurs ou encore prennent des marges de sécurité trop grandes par exemple. En revanche, ils considèrent qu'elles ont le mérite de soulever de nombreuses questions essentielles à se poser sur le terrain, et d'aider l'utilisateur à se placer dans le bon état d'esprit. Malgré tout, un écart persiste entre les méthodes existantes et la façon dont les experts prennent leurs décisions sur le terrain [Landrø2018] [Landrø2020a] [Landrø2020b].

De plus, si certains auteurs, considérant le fait que les méthodes d'aide à la décision existantes permettent de réduire le nombre d'accidents (comme le montre les études présentées dans la section précédente, estimant le nombre d'accidents passés qui auraient pu être évités), préconisent l'utilisation des méthodes d'aide à la décision existantes, on trouve dans la littérature un avis parfois opposé sur la question. Höller indique en effet, sur la base d'arguments présentés dans sa publication [Höller2018], que "*il semble que les méthodes stratégiques ne conviennent ni aux débutants ni aux experts (guides de montagne)*".

Au vu de cet avis [Höller2018], de l'écart entre les méthodes existantes et le mode de fonctionnement adopté par les experts sur le terrain [Landrø2018] [Landrø2020a] [Landrø2020b] et des analyses conduites ci-avant sur les différentes méthodes (critères utilisés, types de méthode (statistique ou experte), flexibilité etc., voir Section 1.2.2), nous pouvons établir un certain nombre de recommandations et proposer un cadre pour le développement d'une future méthode, ou l'amélioration de méthodes existantes.

### 1.3.1 Cadre et recommandations

D'après les principaux constats émanant de l'état de l'art, plusieurs besoins émergent. Par conséquent, une future méthode devra en effet satisfaire plusieurs points.

- 1) Elle devra être utilisable durant l'ensemble des phases d'une sortie à ski, ce qui permet une réévaluation des premières conclusions et une tolérance aux fautes.
- 2) Elle devra présenter une certaine flexibilité. Cela permettra d'abord à l'utilisateur de se sentir investi en prenant part à la méthode. Cela lui permettra ensuite de ne pas subir une décision automatiquement imposée et lui offrira donc la possibilité, à travers certaines marges de manœuvre, d'adapter la méthode à ses besoins et aspirations en réduisant certains aspects contraignants et augmentant son potentiel de mobilité. Ainsi, l'utilisateur pourra davantage s'approprier la mé-

thode et l'utiliser.

3) Par contre, la méthode devra veiller, en réaction au point 2 cité ci-dessus, à ne pas être totalement subjective. Elle devra donc rester cadrée et bornée et non pas être laissée entièrement au seul jugement de l'utilisateur. C'est pourquoi les paramètres considérés dans les méthodes devront être clairement formalisés et définis, ce qui n'est pas systématiquement le cas actuellement, certains n'étant que peu voire pas étudiés.

Ces trois premiers points mettent en évidence qu'une future méthode devra s'approcher autant que possible du centre de la Figure 1.2.

4) Une future méthode devra permettre de traduire une vue d'ensemble de la situation en cours, et devra donc faire appel à un nombre importants de paramètres.

Ce point signifie donc qu'elle devra être représentée sur la Figure 1.2 par un disque de grand diamètre.

5) Cependant, un autre enjeux, antagoniste au précédent, résidera dans le fait de conserver un nombre de paramètres suffisamment réduit pour que le résultat obtenu reste aisément interprétable par l'utilisateur; la capacité d'un décideur à combiner un nombre important de paramètres étant en effet limitée. Un compromis devra donc résulter des points 4 et 5.

6) Une future méthode devra à la fois être statistique et experte. En effet, si les méthodes statistiques ont fait leur preuve en tant qu'outils d'aide à la décision, elles doivent être complétées par des connaissances analytiques et expertes afin de performer encore davantage. Ainsi, une méthode pourra se baser sur les avantages liés à chacun des deux types de méthodes possible.

Ce point signifie donc qu'une méthode devra être représentée sur la Figure 1.2 par une disque bicoloré (à la fois noir et blanc, i.e. être à la fois une méthode statistique et experte).

7) Enfin, une future méthode devra adopter une logique plus souple, qui lui permettra à la fois de gérer les incertitudes inhérentes aux paramètres qu'elle considère et intégrer un raisonnement humain (comme cela est évoqué dans la prérogative précédente).

En réponse à ces différents besoins nous pouvons proposer un cadre et des recommandations pour le développement de futures méthodes ou l'amélioration de méthodes existantes.

D'abord, il est nécessaire de trouver un équilibre entre la possibilité de transcrire une vue d'ensemble de la situation et le nombre de critères utilisés dans la méthode. La méthode doit en effet permettre la meilleure évaluation possible de la situation en cours. Pour cela, elle doit considérer un grand nombre de critères afin de passer en revue autant d'éléments impliqués dans le déclenchement d'avalanches que possible et permettre l'évaluation la plus précise possible de la situation. Les différents critères pris en compte ne seront autres que des éléments relatifs aux critères principaux émanant des cinq situations typiques d'avalanches, permettant de les décrire précisément. Un exemple permet d'illustrer ce besoin. L'utilisation de seulement deux critères, nécessairement incertains, comme cela est le cas par exemple de l'inclinaison des pentes et du niveau de danger du bulletin qui sont les deux seuls critères considérés par la MRE, ne peut que conduire à une résultat incertain (et dont la résilience n'est pas toujours satisfaisante). D'un autre côté, plus le nombre de critères utilisé sera important, plus les informations données par les uns sera en mesure de préciser et éventuellement compenser les incertitudes qui entâchent les autres. Ainsi, la multiplication des critères utilisés rendra possible un raffinement du résultat en compensant les données les plus sujettes à incertitudes et donc les imprécisions et erreurs. Cela permettra alors à la méthode de devenir plus performante dans son évaluation de la situation avalancheuse. Puisque les experts s'appuient sur plus de 33 critères pour prendre leur décision [Landrø2020b], le fait de prendre en compte un grand nombre de critères dans la méthode n'est pas nécessairement un inconvénient. Un travail est donc nécessaire pour que les cinq critères issus des situations typiques prennent en compte tout ce qui doit être étudié et passé en revue dans une telle méthode. Ils seront donc à décomposer, pour s'apparenter aux 40 critères (hors facteur humain) mis en évidence par Landrø et al. Cependant, comme mentionné ci-avant, le principal challenge sera de maintenir un compromis entre l'utilisation d'un nombre de critères suffisant pour refléter la situation et une facilité de mise en œuvre et de compréhension de l'interaction

entre les différents critères. Ainsi, la méthode devrait autant que possible minimiser le nombre de critères qu'elle exploite.

Ensuite, nous pensons que la méthode doit laisser à l'utilisateur une certaine flexibilité et des marges de manœuvre. Il semble en effet important de laisser à l'utilisateur la possibilité d'affiner les valeurs qu'il fournit à la méthode. Ainsi et puisque les différents utilisateurs sont susceptibles d'avoir des objectifs qui diffèrent, le résultat suggéré correspondra davantage aux attentes et besoins de chacun au regard de l'utilisation qu'il souhaite en faire. La méthode devrait donc avoir une certaine flexibilité, qui permettra à l'utilisateur de se sentir impliqué plutôt que d'obtenir un résultat imposé sans être capable d'agir. L'objectif cependant est de permettre à l'utilisateur d'affiner les valeurs, tout en restant limité entre certains seuils pour que la méthode ne puisse pas devenir trop subjective et par conséquent sujette à différents biais.

Les outils actuels (tels que les Modèles Numériques de Terrain ou les stations météorologiques autonomes par exemple) permettent en effet l'évaluation automatique de certains critères et cette première évaluation pourrait être corrigée ou affinée par l'utilisateur dans un second temps. En plus de l'automatisation, certains critères sont évalués statistiquement. Ces derniers pourraient alors faire l'objet de correction ou précision apportées ensuite par l'utilisateur.

Enfin, la méthode devra être en mesure de prendre en compte les incertitudes inhérentes au phénomène étudié. Comme nous l'avons vu précédemment, les incertitudes sont une part intégrante de la gestion du risque d'avalanche [Mccammon2004b] [Duclos2012] [Statham2018a] [Höller2018]. Pour cette raison, il est essentiel de la prendre en compte dans les méthodes d'aide à la décision, puisque chaque critère utilisé est sujet à incertitude. Veitinger et al. soulignent en effet que "*Les processus naturels peuvent rarement être décrits ou modélisés comme le résultat de critères ou de variables bien définis.*" et, pour le développement de leur algorithme d'évaluation des zones de départ potentiel d'avalanches (PRA pour *Potential Release Areas*), ils font appel à la logique floue afin de traiter des données imprécises et des règles diffuses [Veitinger2016a], concept déjà utilisé dans d'autres applications portant sur les risques naturels. Munter lui-même évoquait déjà le fait de construire une science sur une connaissance incertaine : il parlait d' "*informations incertaines, incomplètes et contradictoires*" [Munter2003]. À ce sujet, il évoquait le besoin d'une pensée plus flexible qui pourrait être exprimée à travers l'utilisation d'une logique plus souple. Ainsi, une dernière recommandation réside dans le fait de mieux considérer et prendre en compte ces incertitudes dans les méthodes d'aide à la décision.

Par ailleurs, la méthode développée doit être aussi transparente que possible, i.e., éviter d'avoir une approche de type *boîte noire* (comme cela peut être le cas dans la MRQ). Au contraire, la méthode devra être de type *boîte blanche* afin que le résultat final et la manière de l'obtenir puisse être explicable et compréhensible pour l'utilisateur final. Cela permet de gagner un plus haut niveau de confiance de la part de l'utilisateur, et de générer *in fine* une application plus répandue et de meilleure qualité [ACA2015].

Ainsi, nous pouvons donc proposer un cadre utile au développement d'une future méthode ou à l'amélioration des méthodes existantes. En lien avec la Figure 1.2 (qui présente des éléments de synthèse relatifs aux méthodes existantes) et les challenges à relever à l'avenir (présentés ci-dessus comme des recommandations), une future méthode devrait alors :

- être à la fois statistique et experte pour tirer les avantages propres aux deux types de méthodes (i.e. laisser à l'utilisateur de la flexibilité, sans être pour autant totalement subjective) ;
- fournir une vue d'ensemble de la situation tout en ne retenant qu'un nombre raisonnable de critères pour être facilement mise en œuvre sur le terrain (une trentaine semble être un maximum, tous étant des sous-critères des six critères généraux étudiés, critères émergeant des situations typiques d'avalanches, et pouvant alors être combinés grâce à plusieurs agrégations successives) ;
- être utilisable dans les différentes phases successives d'une randonnée à ski afin de constamment remettre en question les premières évaluations ;

- prendre en compte la gradualité du phénomène qui n'est pas de type *tout ou rien*, mais dont les effets de chaque facteur sont progressifs, ainsi que l'incertitude inhérente à ce type d'évaluation.

Nous nous placerons dans nos travaux dans le cadre de l'amélioration d'une méthode existante. En effet, au vu de ces trente années de développement ayant conduit à treize méthodes sans qu'aucune ne fasse véritablement consensus, il ne semble pas utile d'ajouter au panel existant une méthode supplémentaire mais il paraît à l'inverse pertinent d'exploiter et améliorer l'existant.

### 1.3.2 La place de la méthode CRISTAL : cadre complémentaire

Il faut tout d'abord rappeler que nos travaux prennent part au projet CIME dont l'un des partenaires porte le développement de la démarche CRISTAL. Dans ce contexte, nous travaillerons en particulier sur la démarche CRISTAL qui sert alors de point de départ à nos développements. Le projet CIME nous offre donc un cadre de développement, d'expérimentation et de validation, en proposant CRISTAL comme méthode support de nos travaux. Pour plusieurs raisons, CRISTAL est en effet une base solide. Tout d'abord, nous avons vu que les méthodes basées sur des indices évidents étaient plus résilientes que les méthodes statistiques, en particulier lorsqu'elles sont basées sur des règles strictes attribuant une large importance au niveau de danger du bulletin. De plus, l'un de ses principes de base réside dans la prise en compte d'un faible nombre de critères ce qui rend l'ensemble facile à appréhender pour un être humain. Enfin, ces critères visent bien sûr à capturer l'ensemble de la réalité du phénomène ; nous avons vu en effet qu'ils correspondent aux critères issus des situations typiques d'avalanches faisant consensus au niveau européen. Nous présentons ici la place qu'occupe CRISTAL dans l'univers des méthodes présentées ci-avant.

Dans l'ensemble des méthodes existantes, deux familles principales dominent. D'une part, la famille des Méthodes de Réduction de Munter est fortement basée sur des statistiques. Ces méthodes comportent alors un certain nombre de règles fixées, ce qui les rend difficilement modifiables. De plus, elles sont souvent basées sur un très faible nombre de critères, ce qui est contraire aux préférences des experts. D'autre part, si la deuxième famille de méthodes se base sur un nombre de critères qui reste relativement faible (sept indices évidents pour OCM, six paramètres principaux pour CRISTAL), elle cherche tout de même à capturer les principaux éléments permettant de rendre compte de l'ensemble de la situation.

La démarche CRISTAL est la dernière née de cette seconde famille. Étant principalement basée sur des règles expertes, elle présente actuellement des aspects subjectifs. Aussi, ses six principaux critères sont qualitatifs et donc sujets à être développés et déclinés en sous-critères pour disposer d'une formalisation plus précise. Nos travaux prendront part à cette évolution. L'utilisation de statistiques pourra être favorisée, ce qui permet de suivre le cadre présenté ci-avant, en rendant la méthode à la fois experte et statistique tout en réduisant sa subjectivité. Il est en effet plus aisé d'ajouter des statistiques et contraintes à une méthode experte que de redonner, a posteriori, de la flexibilité à des méthodes statistiques comme celles de la famille des Méthodes de Réduction de Munter.

De plus, la démarche CRISTAL présente les différentes phases de détection, d'analyse et de décision (voir Figure 1.3) qui sont propres à une véritable méthode d'aide à la décision. Ces trois étapes permettent en effet d'aider l'utilisateur à cheminer vers sa décision finale et non de lui imposer un comportement final à suivre. Elle intègre donc l'ensemble du processus de décision, de l'observation et l'évaluation à la décision et l'action sur le terrain.

Afin de compléter le cadre proposé en Section 1.3.1 qui consiste à ce qu'une méthode se rapproche autant que possible du centre de la Figure 1.2 et sous la forme d'un large disque bicolore (voir Section 1.3.1), nous suggérons le cadre complémentaire proposé en Figure 1.4. Il permet de répondre aux attentes mentionnées tout en conservant les forces des méthodes existantes et en particulier de la démarche CRISTAL pour la création ou l'amélioration d'une méthode.

Une méthode devrait être composée des trois étapes que sont : la *détection*, l'*analyse* et la *décision*.

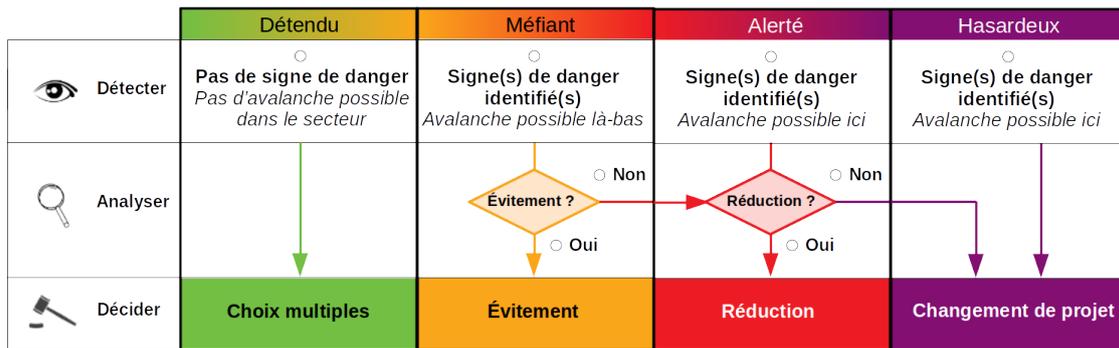


Figure 1.3 – Détecter, analyser, décider : trois phases de la démarche CRISTAL

La première étape vise à évaluer la situation tandis que la formalisation des deux dernières étapes permet d'aller au delà du résultat de type "tout-ou-rien" proposé par la plupart des méthodes. En phase de détection, la méthode devrait permettre l'évaluation la plus complète possible de la situation sur la base d'un nombre de critères adapté. Ces critères liés au terrain ainsi qu'aux conditions nivo-météorologiques permettront une estimation objective du danger. La phase de détection devrait aussi permettre la prise en compte des facteurs humains, liés au groupe, et permettre ainsi de passer de la détection d'un danger à la détection du risque, incluant dans l'analyse l'élément à risque.

Comme nous l'avons suggéré, l'étape de détection pourra être composée de deux phases :

- Une première phase pour réaliser une première évaluation de la situation. Même si certains critères sont susceptibles de rester manuels, cette phase peut être assistée par ordinateur, en prenant en considération des critères majoritairement obtenus automatiquement et extraits de statistiques. Cette phase peut donc au moins partiellement être automatisée, ce qui permet à l'utilisateur de la mettre rapidement en œuvre sur le terrain et économiser du temps d'implémentation. Les critères pourraient donc majoritairement être issus de statistiques, comme le font les méthodes statistiques actuelles, mais en veillant à conserver un résultat explicable. Cependant, une méthode statistique doit rester spécifique à une région donnée. Ainsi, une méthode statistique ne peut donc pas être extrapolable à l'échelle mondiale, ou alors les statistiques doivent pour cela être ré-établies localement. Les processus développés pour l'extraction des critères devront donc veiller à être génériques et transférables. À l'issue de cette phase, un premier résultat peut être communiqué. Aussi, les critères les plus prépondérants (i.e. ceux qui ont eu le plus de poids sur le résultat final) pourront être extraits. L'utilisateur devient alors conscient des critères qui ont le plus influencé le résultat global, et peut les ré-évaluer et les affiner dans une seconde phase.
- Une seconde phase pour permettre à l'utilisateur d'affiner les principaux critères. Pour cela, il pourra soit leur donner les valeurs qu'il estime correctes (s'il manque de confiance dans les statistiques générales et l'automatisation de ces critères) soit décider de valeurs moins graduelles que celles proposées initialement par l'automatisation. Si la méthode se base sur la logique floue (afin de prendre en considération les incertitudes et l'aspect graduel du phénomène), chaque critère recevra en effet différents degrés d'appartenance aux différentes valeurs qu'il est susceptible de prendre ; l'utilisateur sera alors en mesure de trancher en faveur de l'une ou l'autre des valeurs. Permettre à l'utilisateur d'affiner les valeurs estimées pour certains critères favorise l'acceptation de la méthode, évitant alors un effet "boîte-noire" et permettant à l'utilisateur de s'impliquer davantage dans le processus. Cette phase fera par contre principalement appel à l'expertise de l'utilisateur.

Les deux phases d'analyse et de décision de la démarche CRISTAL sont aujourd'hui bien for-

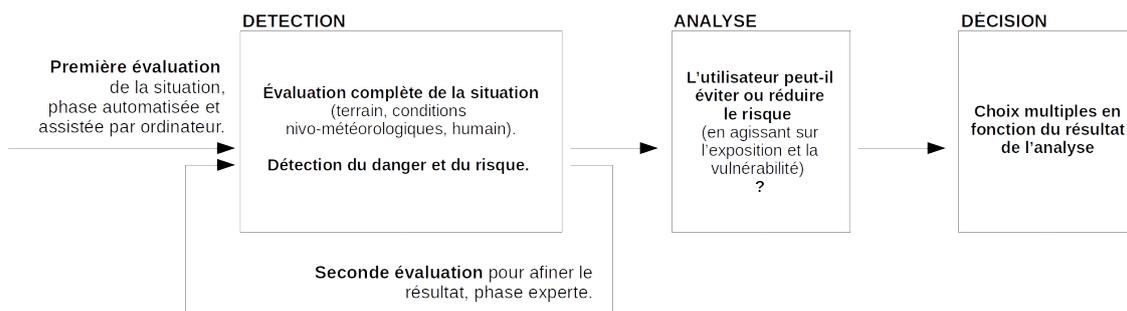


Figure 1.4 – Représentation schématique du cadre proposé

malisées et explicitées par [data-avalanche.org](http://data-avalanche.org)<sup>2</sup>, c'est pourquoi nous interviendrons sur sa phase de détection (qui conduit des six critères (appelés *paramètres* par Duclos dans le cadre de CRISTAL) aux quatre modes de vigilance exploités ensuite dans l'analyse).

Nos travaux de recherche viseront donc à permettre l'amélioration de CRISTAL, en cherchant : 1) à la faire se rapprocher du centre de la Figure 1.2 (i.e. perdre en subjectivité et rester utilisable dans toutes les phases d'une randonnée à ski), 2) à la faire être un disque bicolore (en n'étant plus seulement experte, mais en intégrant des analyses statistiques) et 3) à exploiter le potentiel dont elle dispose déjà, le fait d'être un disque de large diamètre (i.e. intégrant des critères capables de donner une vision d'ensemble de la situation).

### 1.3.3 Formulation d'un besoin

Si CRISTAL présente une base solide, elle contient aussi plusieurs manques générant un besoin à l'origine de nos travaux. D'abord, CRISTAL se base sur six critères principaux qui sont seulement qualitatifs. Leur évaluation, experte, ne peut donc qu'être soumise à certains biais et différer d'un utilisateur à l'autre. Ces six critères nécessitent donc d'être davantage formalisés afin d'être automatiquement évalués. De plus, il est évident que pour leur analyse, un expert fait appel à de nombreux sous-critères ; ceux-ci doivent donc être déclinés et explicités. Ensuite, CRISTAL manque de formalisation permettant le passage des six critères aux quatre modes de vigilance (voir Démarche CRISTAL, Section 1.2.1) obtenus à l'issue de la phase de détection. Ce processus, s'il peut être mis en œuvre mentalement par des experts et en particuliers par les créateurs de la démarche, n'a jamais été clairement explicité et n'est donc pas formalisé et reproductible par divers utilisateurs.

Ces manques nous conduisent à identifier deux objectifs :

1. Proposer une façon d'estimer et évaluer les six critères principaux de CRISTAL, ce qui demande de les décrire et les décomposer, car s'ils sont simples (i.e. facile à imaginer et retenir), ils ne sont pas simplistes (ils sont en effet complexes, à l'image du phénomène étudié) et se décomposent donc en de nombreux sous-critères à prendre en compte et définir.
2. Faire émerger des règles de combinaison qui permettent d'obtenir un résultat global car, bien que les modes de vigilance soient au cœur de la démarche, il n'existe pas de règles ni de façon explicite d'estimer lequel est adapté à la situation en cours, sur la base des critères observés et mesurés.

Ces besoins décrivent donc notre question de recherche, multiple et séquentielle. Dans ce contexte, le Chapitre 2 commencera à répondre à la première question de recherche : il explicitera les six critères principaux en faisant émerger les sous-critères qui les composent. Le Chapitre 3 terminera de répondre à la première question de recherche en proposant une façon d'estimer et évaluer les

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

critères de CRISTAL ; deux des six critères ont ainsi été traités dans le cadre de nos travaux. Le Chapitre 4 répondra alors à la seconde question de recherche et proposera la combinaison de l'information qui conduit à la décision avant de donner une validation du système global développé. Enfin, une conclusion et des perspectives seront données.

Nous souhaitons souligner que les principaux développements qui seront réalisés, pour permettre d'explicitier les critères (et sous-critères) et être en mesure de savoir les estimer, seront réalisés dans le cadre de CRISTAL. Cependant, ils pourront s'adapter à d'autres méthodes. SoG et SC en particulier, qui prennent en compte dans leur *check 2* et *Faktorencheck* la plupart des six critères étudiés ici, sans les expliciter, pourraient elles aussi intégrer ces nouveaux développements. De même, les travaux réalisés sur certains critères pourront ponctuellement servir à impacter positivement et améliorer leurs évaluations dans les méthodes existantes. Plusieurs critères sont en effet parfois pris en compte de manière vague ou peu définis.

Ensuite, et en réaction aux remarques qui ont pu être mentionnées ci-avant concernant les statistiques, nous veillerons à ce que leur développement soit suffisamment générique pour être transférable ailleurs (i.e. sur les données d'autres massifs) et répétable dans le temps (i.e. pour pouvoir être mis à jour sur des jeux de données actualisés ou recalculé sur des données récentes). Enfin, nous veillerons à garder en tête que le phénomène naturel étudié est variable, et donc sa réalisation en réalité certainement moins nette et tranchée que les résultats tirés des statistiques, pour cela nous veillerons à ne pas les considérer strictement mais à conserver une logique plus souple. Enfin, nous veillerons à ce que tous les résultats obtenus et chaque développement soient au final explicables, pour éviter l'effet "boîte-noire" et leur permettre d'être directement utilisés par les professionnels de la montagne, qui ne peuvent baser leurs décisions sur des résultats obscures ou incompris, de sorte à pouvoir toujours les justifier.



# 2

## Des critères tangibles : décomposition et formalisation

---

*Ce chapitre répond en partie à la première question de recherche qui vise à formaliser et décrire les six critères principaux issus des situations typiques d'avalanche et exploités dans CRISTAL. Il détaille le passage des critères (simples mais non simplistes) aux sous-critères et paramètres qui les composent, faisant ainsi émerger la complexité du phénomène étudié.*

*Si le niveau de danger du BERA est présenté comme un critère qui diffère des autres, ce chapitre donne, pour chacun des cinq critères restants, un bref aperçu de la littérature et les principales connaissances associées, permettant d'explicitier la décomposition en sous-critères que nous proposons.*

---

### Sommaire

---

<b>2.1 Niveau de danger du BERA</b>	<b>44</b>
<b>2.2 Inclinaison des pentes</b>	<b>46</b>
2.2.1 Inclinaison des pentes et avalanches	46
2.2.2 Décomposition du critère C2 <i>Inclinaison des pentes</i>	49
<b>2.3 Observations d'avalanches récentes</b>	<b>54</b>
2.3.1 Observations d'avalanches comme indicateur de danger	54
2.3.2 Décomposition du critère C3 <i>Observations d'avalanches récentes</i>	55
<b>2.4 Augmentation de température et fonte</b>	<b>60</b>
2.4.1 Influence de la température sur le manteau neigeux	60
2.4.2 Décomposition du critère C4 <i>Augmentation de température et fonte</i>	61
<b>2.5 Surcharges nouvelles</b>	<b>62</b>
2.5.1 Surcharges du manteau neigeux	62
2.5.2 Décomposition du critère C5 <i>Surcharges nouvelles</i>	65
<b>2.6 Couche fragile enfouie</b>	<b>66</b>
2.6.1 Couche fragile et caractéristiques	66
2.6.2 Décomposition du critère C6 <i>Couche fragile enfouie</i>	67
<b>2.7 Synthèse</b>	<b>70</b>

---

## Préambule

Dans le Chapitre 1, nous avons présenté les facteurs contributeurs des avalanches, i.e. les facteurs qui interviennent dans le déclenchement des avalanches. Nous rappelons que ces facteurs sont à l'origine des critères voire sous-critères et paramètres pris en compte dans les méthodes d'aide à la décision. Les deux termes, *facteur contributeur* et *critère*, désignent donc les mêmes éléments, mais traduisent deux points de vues ou deux contextes différents. Si nous parlons de facteurs contributeurs lorsque nous décrivons le phénomène d'avalanche (voir Chapitre 1), nous employons ici le terme critère puisque cette section se place dans le contexte des méthodes d'aide à la décision.

Pour rappel et comme nous venons de le voir dans l'état de l'art, les critères qui sont essentiels et que nous expliciterons dans notre système sont les six critères principaux suivants qui, une fois détaillés, permettent de donner une vue d'ensemble de la situation : 1) *Niveau de danger du BERA*, 2) *Inclinaison des pentes*, 3) *Observations d'avalanches récentes*, 4) *Augmentation de température et fonte*, 5) *Surcharges nouvelles* et 6) *Couche fragile enfouie*. Ils feront chacun l'objet de l'une des sections de ce chapitre (Sections 2.1 à 2.6).

Avant de pouvoir proposer une façon d'estimer et évaluer les six critères principaux de CRIS-TAL, il est nécessaire de les décrire et de les décomposer, car bien que tangibles, ils sont complexes et font en réalité appel à de nombreux éléments sous-jacents. Ils se décomposent tous en effet en plusieurs sous-critères à prendre en compte et à définir. Actuellement, les six principaux critères étudiés sont qualitatifs et donc sujets à être développés et déclinés en plusieurs niveaux de sous-critères permettant de les expliciter. Ces éléments sont alors directement évalués et permettent de disposer d'une formalisation plus précise des six critères principaux.

Dans un nécessaire souci de simplification du phénomène, nous portons sur les différents critères une vision fragmentée, dans laquelle chaque critère est indépendant des autres, même si, dans la réalité, il existe une relation complexe unissant les différents paramètres [Schweizer2003].

Ce chapitre présente alors la décomposition de chacun des critères. Les Sections 2.2 à 2.6 sont toutes construites sur le même modèle. Elles font d'abord état des connaissances relatives à ces critères sur la base des informations disponibles dans la littérature (Sections 2.2.1, 2.3.1, 2.4.1, 2.5.1 et 2.6.1). Elles synthétisent ensuite la décomposition en plusieurs niveaux de sous-critères et paramètres que nous proposons, sur la base de la littérature et pour satisfaire les besoins de notre modèle (Sections 2.2.2, 2.3.2, 2.4.2, 2.5.2 et 2.6.2). Les différentes valeurs que sont susceptibles de prendre chacun de ces éléments sont elles aussi explicitées. Nous verrons que le cas du critère lié au niveau de danger du BERA est à part (voir Section 2.1). Nos travaux ont principalement ciblé les critères C2 *Inclinaison des pentes* (qui traduit les prédispositions liées au terrain, permettant ou non le départ d'avalanches), C3 *Observations d'avalanches récentes* (puisque'il s'agit d'un indicateur clair du danger en cours, n'ayant pas fait jusqu'à présent l'objet de quantification) et C6 *Couche fragile enfouie* (témoignant des prédispositions liées aux conditions préalables, critère nécessaire au déclenchement d'avalanches de plaques). Les critères C4 et C5, liés aux conditions météorologiques (augmentation de température et fonte, ainsi que surcharge), quant-à eux, correspondent à des éléments déclencheurs et aggravants, mais ne constituent pas des éléments nécessaires au déclenchement, notamment dans le cas d'avalanches de plaques (type d'avalanche menaçant le plus les pratiquants de sports de montagne). Pour ces raisons, ces critères n'ont pas fait l'objet d'étude approfondie et devront faire l'objet de développements futurs.

Dans ces travaux, nous devons modéliser des données incertaines : incertitudes sur les critères, sous-critères et paramètres, gradualité des phénomènes pris en compte, valeurs linguistiques exprimées par les experts. Pour cela, nous aurons recours à l'une des théories existantes, permettant cette modélisation. Parmi les plus courantes qui permettent de gérer et modéliser des données incertaines, nous pouvons citer les probabilités [Ahmed2016], la théorie des sous-ensembles flous ou encore la théorie des possibilités [Mauris1997]. Dans notre contexte, nous avons choisi d'exploiter la théorie des sous-ensembles flous (voir Annexe B). Elle permet notamment d'exprimer

---

la gradualité des phénomènes étudiés et de traduire les valeurs linguistiques employées par les experts pour les décrire. La prise en compte de la gradualité est en effet essentielle dans nos travaux puisque, pour la plupart des critères, l'expression d'une valeur seuil unique est trop stricte pour représenter la réalité. De plus, c'est l'accumulation de chaque nuance, même minime, qui doit être prise en compte puisque chacune influe peu à peu sur le résultat final. Ensuite, les connaissances des experts du domaine sont le plus souvent exprimées à travers des termes linguistiques spécifiques (comme par exemple "pentes avalancheuses", "grande avalanche"). S'ils sont de sens commun dans l'univers du discours des professionnels, ces termes (ici *avalancheuses* et *grande*) nécessitent d'être rendus intelligibles dans le modèle. Les termes employés par les experts sont par définition les plus adaptés à la description et à la compréhension des phénomènes, c'est pourquoi nous appuyons nos travaux sur ceux-ci. De plus, la théorie des sous-ensembles flous est l'une des plus faciles à appréhender, permettant *in fine* une meilleure compréhension du système développé pour les professionnels de la montagne, ce qui est l'un des points clefs essentiel à la réussite d'un projet tel que le projet CIME dans lequel s'inscrivent ces travaux. Les professionnels, qui engagent leur responsabilité, ne s'approprieront en effet pas un système non compris ou de type boîte noire. Ainsi, dans les travaux présentés ci-dessous, les valeurs que peuvent prendre les critères et sous-critères sont majoritairement définies par des sous-ensembles flous [Zadeh1965]. Les figures les illustrant sont données dans ce chapitre. Chaque valeur de sortie (i.e., c'est-à-dire chaque mot de l'univers du discours) se verra donc assigner un degré d'appartenance compris entre 0 et 1 (dépendant de la valeur donnée en entrée); comme par exemple  $0,8/Pentes\ non-avalancheuses$ .

Comme évoqué, nous avons à faire à plusieurs niveaux de décompositions : des critères, sous-critères et même sous-sous-critères (appelés paramètres afin d'alléger les termes employés). Pour structurer et clarifier les informations, nous utiliserons les notations suivantes :

- $C_x$  pour un critère (par exemple  $C_2$  pour le critère *Inclinaison des pentes*),
- $C_{x.x}$  pour un sous-critère (par exemple  $C_{2.6}$  pour *Peut emporter le skieur*, sixième sous-critère du critère  $C_2$  *Inclinaison des pentes*),
- $C_{x.x_x}$  pour un paramètre, soit un sous-sous-critère (par exemple  $C_{2.4_2}$  pour le paramètre *Distance horizontale* intervenant pour l'estimation du quatrième sous-critère  $C_{2.4}$  *Peut atteindre le skieur*).

Notons que la décomposition en sous-critères et paramètres que nous proposons dans ce chapitre est issue à la fois de l'interprétation des connaissances présentes dans la littérature et d'un travail exploratoire mené conjointement avec l'expert en nivologie, Alain Duclos, associé à notre projet. C'est donc sur la base des connaissances existantes, de son expertise, de nombreux temps d'échanges et de réflexion ainsi qu'en réalisant plusieurs phases successives de tests que nous avons obtenu et précisé, par étapes, l'ensemble des éléments présentés dans ce chapitre. Il en est de même pour l'identification des valeurs de sorties que peuvent prendre chacun de ces éléments. Les différentes modalités (i.e., les différents sous-ensembles flous associés à chaque élément, donc les différentes valeurs de sortie qu'ils peuvent prendre) ont elles aussi émergé de ce processus de recueil de l'information auprès de notre expert. Souvent, trois catégories de valeurs graduelles suffisent pour traduire la réalité et la variabilité du phénomène telles que peuvent l'identifier, le comprendre et l'interpréter les professionnels de la montagne. Parfois, plus de nuances sont apportées lorsque cela s'avère nécessaire pour traduire différentes situations nuancées générant des différences considérées comme significatives du point de vue de la situation à analyser. Notons par ailleurs qu'il est essentiel de conserver un nombre restreint de sous-critères et/ou paramètres ainsi que de valeurs pour que leur combinaison soit compréhensible et explicable. Puisque nous travaillerons avec différents niveaux d'agrégation successifs et non un unique système global de combinaisons (voir Chapitre 4), nous nous affranchissons aisément de cette contrainte, conservant à chaque niveau un nombre limité de paramètres permettant d'expliquer la majorité des nuances. Il reste cependant nécessaire de trouver un compromis dans le nombre de paramètres utiles et de ne pas "sur-décomposer" les critères, ce qui conduirait à une "sur-précision" par rapport aux valeurs

de sorties que l'on cherche à obtenir (quatre modes de vigilance possibles). Si le système flou pour l'aide à la décision, par nature, constitue une approximation du phénomène, ce travail exploratoire a fait l'objet d'une phase de test sur des cas concrets permettant de valider la décomposition des critères, leurs modalités et la base de règles développée (voir Chapitre 4).

## 2.1 Niveau de danger du BERA

Le BERA est constitué d'un indicateur du niveau de danger d'une part et d'informations textuelles décrivant la situation en cours d'autre part. La plupart des méthodes d'aide à la décision existantes prennent en compte le niveau de danger (qui est l'un des six critères étudiés ici). Pourtant, le niveau de danger ne représente qu'une sous partie du BERA. De manière similaire, les lecteurs du BERA se concentrent généralement sur le niveau de danger et accordent une importance moindre aux informations textuelles rédigées.

Le niveau de danger, seul, est pourtant contesté. Il correspond à un indicateur concernant une échelle d'ordre régional et non local [Schweizer2018]. Attribué pour une région complète, le niveau de danger du bulletin inclut de nombreuses pentes. Il n'est donc pas adapté à une prise de décision au niveau d'une pente spécifique [Landrø2018]. Le niveau de danger du BERA reste en effet un indicateur du niveau de danger moyen sur un large secteur, pouvant masquer des situations plus sûres mais aussi plus dangereuses localement. La prise de décision locale, au niveau de la pente, devrait s'appuyer sur le type de problème d'avalanche en combinaison avec les caractéristiques du terrain [Harvey2009a]. Ainsi, même si le niveau de danger est, pour un massif donné, un bon indicateur de la situation probable [Landrø2020b], les informations textuelles contenues dans le bulletin restent les plus importantes et devraient jouer un rôle plus conséquent dans les futures méthodes [Landrø2018]. Ces informations permettent de distinguer les différents types d'avalanches attendus et de prendre des mesures de gestion adaptées [Atkins2004]. Les facteurs pertinents à observer sur le terrain sont en effet différents selon le type d'avalanche auquel le pratiquant est confronté [Jamieson2010]. Météo France, qui établit les BERA français, confirme que le niveau de danger du bulletin, seul, ne suffit pas ([http://www.meteo.fr/guide/avalanche\\_bra.html](http://www.meteo.fr/guide/avalanche_bra.html)). Dans la pratique des sports de montagne, le seul niveau de danger du BERA ne semble en effet pas être une base solide puisque de nombreuses courses menées sous un indice de risque (régional) élevé ont pu localement se dérouler sans encombre, tandis que d'autres, lors d'un niveau de danger faible ont pu conduire à des accidents mortels.

De plus, le niveau de danger du BERA est aussi contesté dans la littérature dans le sens où il n'est finalement pas aisé de comprendre comment tous les éléments pris en compte sont combinés pour ne donner au final qu'une valeur [Schweizer2018]. Le niveau de danger du bulletin cherche en effet à traduire à la fois la probabilité de déclenchement, la fréquence et la localisation des lieux de déclenchement ainsi que la taille potentielle des avalanches. À cela s'ajoute le fait que le niveau de danger du bulletin est particulièrement soumis au jugement du prévisionniste et donc à l'inclusion de biais [Statham2018b] (voir Chapitre 1). Ainsi, le développement d'une méthode sur la base de ce paramètre, par nature sensible et instable, reposerait sur une base fragile, difficilement généralisable.

Les méthodes d'aide à la décision devraient donc plutôt se baser sur l'évaluation du manteau neigeux ainsi que sur le type de problème d'avalanche (par exemple : plaque, neige sèche sans cohésion, neige humide) plutôt que sur le seul niveau de danger exprimé dans le BERA. À ce sujet, et pour renforcer les idées présentées ci-dessus, nous pouvons citer quelques informations énoncées par les auteurs de certaines méthodes d'aide à la décision, qui montrent les faiblesses du bulletin d'avalanche ou justifient la non-utilisation directe du niveau de danger dans leurs méthodes. Schudlach et al., dans leur article présentant la MRQ, annoncent en effet que les informations du

bulletin d'avalanche sont "*très généralisées et sujettes à incertitude*" [Schmudlach2018]. Harvey et al. indiquent que dans leur méthode (TGoNTG) le bulletin peut être une aide mais n'est pas une contrainte fixée. Ils évoquent en effet que "*la probabilité d'avalanche n'est pas directement dépendante du niveau de danger estimé dans le bulletin*" [Harvey2018a]. Enfin, Bolognesi remet lui-aussi en question l'utilisation directe du niveau de danger du BERA, celui-ci n'étant pas un facteur de risque. La méthode qu'il propose, le NivoTest, réévalue donc un niveau de danger local et ne prend pas en compte le niveau de danger indiqué dans le bulletin pour son estimation du risque d'avalanche [Bolognesi2000].

Ainsi et pour résumer, le critère C1 *Niveau de danger du BERA* n'est donc pas un facteur contributeur des avalanches. Il ne peut donc pas être considéré dans les méthodes au même titre que les cinq autres critères principaux. En effet le niveau de danger du BERA correspond déjà à une évaluation de la situation en cours et à l'agrégation de plusieurs éléments. Les autres critères pris en compte dans les méthodes, une fois bien explicités et décomposés, permettent eux-mêmes d'évaluer le niveau de danger et de considérer l'équivalent des informations textuelles du bulletin. En effet, à travers les cinq autres critères à prendre en compte (basé sur les facteurs nivo-météorologiques et le terrain), une méthode d'aide à la décision cherche à donner une vue d'ensemble de la situation et à donc estimer le niveau de danger en cours. Par exemple, sur la base de la constitution du manteau neigeux (couche fragile enfouie) ou encore de l'augmentation de température, elle pourra, comme le bulletin, estimer le type de problème d'avalanche attendu et leur localisation (altitude, orientation des pentes). La prise en compte du niveau de danger exprimé par le BERA au même titre que les cinq autres critères principaux reviendrait donc à une redondance des informations considérées. De plus, l'estimation de la situation à travers l'évaluation des cinq critères autres que le niveau de danger du bulletin permet une analyse locale, contrairement à ce qu'offre le bulletin, qui n'est autre qu'une généralisation à l'échelle du massif (quelques centaines de kilomètres carrés) [CNRMa]. Le bulletin cherche à communiquer un risque moyen à une échelle régionale tandis que les méthodes d'aide à la décision doivent estimer le risque maximal local.

Ainsi, nous faisons le choix de ne pas prendre en compte le niveau de danger du BERA dans le système au même titre que les cinq autres critères. En revanche, le BERA étant une source publique qui fait référence depuis longtemps, il est nécessaire de conduire une réflexion sur la façon de le prendre en considération dans le système global, a minima à titre comparatif. L'indice de risque du bulletin reste en effet un indicateur facilement accessible et, pour des professionnels de la montagne, un accident survenu par risque 4 n'aura certainement pas les mêmes conséquences (juridiques par exemple) qu'un accident survenu par risque 1.

À ce titre, il semble donc intéressant de proposer une comparaison et mise en confrontation du niveau de danger exprimé dans le BERA et du résultat (indépendant du bulletin) communiqué par la méthode d'aide à la décision dans sa phase de détection. La méthode existante qui s'apparente le plus à cette démarche est NT (NivoTest). Cependant, dans sa phase de diagnostic, NT combine le score donné par la méthode au niveau de danger du bulletin pour donner une estimation finale de la situation. Le bulletin, qui couvre une échelle régionale, est donc combiné à l'estimation locale. Dans ce que nous proposons ici, les deux valeurs indépendantes seraient seulement mises en confrontation, sans combinaison en un nouveau résultat final. Le résultat initial donné par la méthode restera inchangé. En effet, son évaluation lui est propre et comme justifié ci-dessus ne peut être influencé par un critère du même type, portant sur une autre échelle et combinant lui aussi l'analyse de plusieurs éléments. La comparaison permettra cependant une éventuelle mise en garde de l'utilisateur en pointant les différences régionales et locales. L'utilisateur pourra prendre conscience de la mesure dans laquelle son évaluation locale est alignée à l'évaluation régionale du bulletin ou si, au contraire, localement la situation semble plus sûre que la situation générale (moyenne régionale) ou à l'inverse plus critique et plus dangereuse.

## 2.2 Inclinaison des pentes

De part son nom, à l'origine, ce critère porte en particulier sur l'inclinaison des pentes environnant l'itinéraire envisagé par le skieur. En réalité, ce critère est plus large et cherche à estimer la propension du terrain à générer une avalanche ainsi que les différentes zones pouvant être atteintes par l'écoulement d'une éventuelle avalanche.

La CLPA (Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche) est alors un très bon indicateur de ces caractéristiques. De fait, l'observation d'avalanches passées prouve que le terrain, associé à certaines conditions, peut être source d'avalanche et indique les zones précédemment impactées. Par nature, les portions de terrain concernées sont donc exposées et critiques : une avalanche y est possible. La prise en compte de la CLPA, dans ce critère, est donc une source d'information non négligeable.

Bien sûr, la CLPA ne couvre pas toutes les zones, et de même, l'absence d'observation passée enregistrée ne présage en rien de l'absence possible d'événements futurs [Cemagref2004]. Dans ce cadre, il est donc essentiel d'évaluer par d'autres sous-critères si une avalanche est susceptible de pouvoir se déclencher sur ce type de terrain. Pour cela, nous proposons la prise en compte de l'inclinaison des pentes. La section suivante présente une revue de littérature renseignant dans quel type de pentes les départs d'avalanche ont lieu.

### 2.2.1 Inclinaison des pentes et avalanches

Nous proposons ici un état de l'art de la littérature portant sur la question suivante : dans quelle.s inclinaison.s de pentes les avalanches sont-elles en mesure de se déclencher ?

Notons d'abord que les avalanches qui affectent le plus les skieurs sont les avalanches de plaques, puisqu'elles se déclenchent en amont du skieur et peuvent donc l'emporter. D'ailleurs, dans la plupart des cas, ce sont les skieurs eux-mêmes qui déclenchent les avalanches qui les emportent [Jamieson1996] [Tremper2001] [Vontobel2013]. On peut lire dans [Schweizer2001b] qu'en Suisse, "*les avalanches déclenchées par les pratiquants contribuent à 90% des décès par avalanche.*" C'est pour cette raison que nous nous intéressons particulièrement dans la suite à ce type d'avalanche et les pentes dans lesquelles elles se déclenchent.

Dès 1977, Perla a établi les premières caractérisations de départs d'avalanches de plaques grâce à des mesures sur le terrain au niveau des lignes de rupture de plaques. Suite à l'analyse de 194 avalanches, l'étude établit que les avalanches nécessitent dans leur zone de départ une portion de pente d'inclinaison de  $25^\circ$  ou plus pour se déclencher [Perla1977]. D'après cet article, moins de 5% des avalanches de plaque se sont déclenchées dans des pentes dont l'angle était inférieur à  $30^\circ$ , et moins de 1% dans des pentes dont l'angle était inférieur à  $25^\circ$ . Ce qui signifie que 4% se sont déclenchées dans l'intervalle ] $25$ ;  $30$ [.

Schweizer et Jamieson ont conduit une étude sur des avalanches reportées et enquêtées en Suisse et au Canada. Sur 809 zones de départ d'avalanches déclenchées par les skieurs, la valeur médiane vaut  $39^\circ$ , les premier et troisième quartiles valant respectivement  $37^\circ$  et  $41^\circ$  [Schweizer2001a]. Sur l'ensemble des observations, des départs ont eu lieu dans une gamme de pentes allant de  $25^\circ$  à  $55^\circ$ , mais les proportions y sont alors extrêmement faibles.

Les conclusions sont similaires dans [Schweizer2001b], où, d'après cette étude, les avalanches de plaques déclenchées par les skieurs sont parties dans des zones de départ dont l'inclinaison médiane était de  $38^\circ$ . La valeur moyenne était de  $38,7^\circ$ . Et sur les 167 cas compris dans leur étude, les observations vont de  $27^\circ$  à  $51^\circ$ , avec des fréquences très faibles pour ces cas limites. La plupart des cas ont en effet été déclenchés dans des pentes d'inclinaisons supérieures à  $38^\circ$ . Ensuite, pour 102 cas parmi les 167 disponibles, la pente a pu être mesurée au niveau du point de déclenchement. Dans ces cas, l'angle médian était de  $35^\circ$  et les déclenchements étaient dans 15% de ces cas réalisés à distance à partir de pentes d'inclinaison inférieure à  $30^\circ$ . Notons que ces fréquences sont aussi influencées par la fréquentation des pentes par les skieurs qui diffère selon les inclinaisons.

De même, McCammon présente des résultats en accord avec les précédentes études : l'analyse de 496 avalanches montre que l'activité avalancheuse culmine à la valeur médiane de 38° (avec une valeur moyenne valant 38,7°), et que 50% des avalanches étudiées se trouvent dans un intervalle de 5° autour de la valeur médiane. 91% des cas d'avalanches étudiés se sont déclenchés dans des pentes comprises entre 30° et 45° [McCammon2009b]. L'auteur a par contre conduit une analyse différenciée par climats, par types d'avalanches ainsi que par types de grains constituant la couche fragile. Dans ces différents contextes, les valeurs diffèrent sensiblement. Dans les climats maritimes, les pentes sont généralement plus raides ; il en est de même lorsque la neige est humide ou la couche fragile non-persistante. En revanche, lorsque la couche fragile est composée de givre de surface, les avalanches sont susceptibles de se déclencher dans des pentes d'inclinaison plus faibles, bien que la valeur médiane vaille 36°.

Pour finir, Veitinger et al. indiquent que les avalanches de plaques se déclenchent dans des pentes comprises entre 28 et 55°, et qu'une probabilité plus importante est observée au dessus de 35° [Veitinger2016a]. D'après eux, au-delà de 45°, la probabilité se réduit de nouveau, du fait de petites coulées permanentes (*constant sluffing*). Pour eux, la capacité d'une pente à générer des avalanches suit donc une courbe en cloche, qui augmente fortement entre 30 et 35° et commence à décroître symétriquement à partir de 45° [Veitinger2016a]. Ainsi, les pentes particulièrement génératrices d'avalanches se trouveraient donc entre 35° et 45°.

Des études se sont intéressées plus précisément aux mécanismes de déclenchement des avalanches de plaques et donc aux forces qui entrent en jeu. Fyffe, en 2006, propose d'estimer la friction à partir de l'angle minimum à partir duquel les avalanches ont lieu. Il affirme qu'en général "*les avalanches de plaques de neige sèche ne se déclenchent pas sur des pentes d'inclinaison inférieure à 30°*" [Fyffe2006]. Il nuance cependant ce propos en indiquant que des avalanches naissant sur des pentes inférieures à 30° se produisent parfois. Il évoque pour cela l'étude de cas de l'hiver 1999 sur les Alpes Européennes, lors duquel, sur environ 800 avalanches étudiées, 4 se sont déclenchées dans des pentes inférieures à 30° (deux à 26°, une à 27° et une à 29°). Cela représente néanmoins au total moins de 0,5% des cas.

Plus tard, dans la même lignée, [Heierli2008] montre que le déclenchement est impossible en dessous de l'angle de friction et que ce dernier vaut, au minimum, 22°. A cela s'ajoutent cependant des forces de résistances, augmentant l'angle à partir duquel les avalanches se déclenchent véritablement. L'auteur ajoute en effet que les avalanches se déclenchant dans des pentes inférieures à 26° sont très exceptionnelles et que des déclenchements compris entre 26° et 30° sont eux-mêmes rares, en citant les études de [Fyffe2006] [Schweizer2003].

Enfin, d'après [van Herwijnen2009], les coefficients de friction mesurés sur des couches fragiles de manteaux neigeux varient de 0,52 à 0,68 (avec une moyenne à 0,57), ce qui correspond à des angles de friction allant de 27° à 34°. Ces angles correspondent alors aux pentes minimum permettant le départ des avalanches.

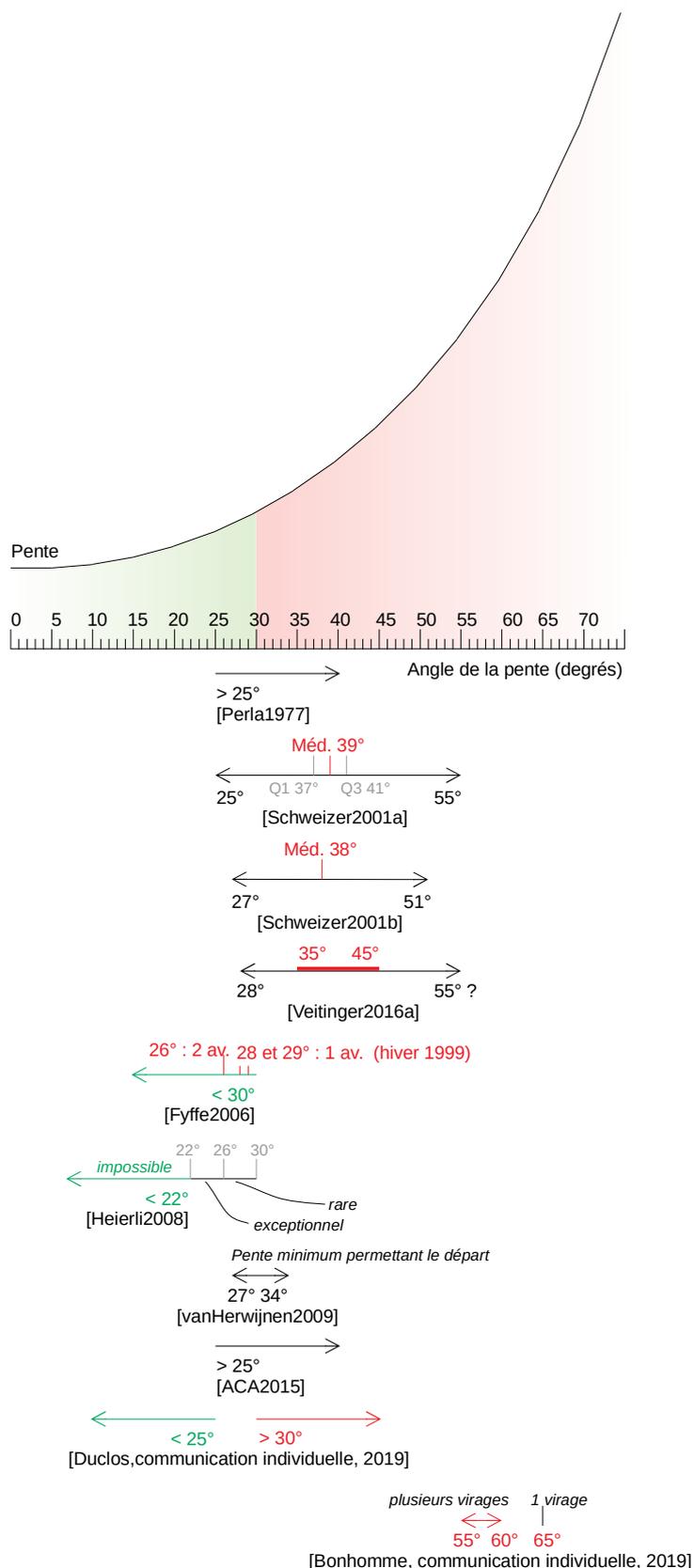
En 2015, l'ACA<sup>1</sup> donne une définition des zones de déclenchement des avalanches. Cette définition confirme les gammes de valeurs citées ci-dessus. D'après eux, la zone de déclenchement est alors définie comme suit : "*Partie du couloir d'avalanche où la neige commence à dévaler vers le bas à partir du point de fracture. Habituellement, l'inclinaison de la pente à cet endroit est supérieure à 25°. Les petites avalanches peuvent s'arrêter sans avoir même franchi cette zone.*" [ACA2015]

L'expert en nivologie avec lequel nous travaillons dans le cadre du projet CIME confirme par expérience cette affirmation ; il affirme qu'en-deçà de 25°, aucun départ d'avalanche ne peut se déclencher et que, plus généralement, c'est un seuil de 30° qui est considéré comme inclinaison minimale permettant le déclenchement d'avalanches.

La figure de synthèse ci-dessous résume les gammes de valeurs présentées dans ces différentes études (voir Figure 2.1).

---

1. Association Canadienne des Avalanches



Méd. : valeur médiane; Q1 : premier quartile; Q3 : troisième quartile; av. : avalanche(s)

Figure 2.1 – Inclinaison des pentes nécessaire au déclenchement d’avalanches, synthèse de la littérature

Ainsi, au vu de l'ensemble de ces informations, à la question de l'inclinaison de la pente nécessaire au déclenchement d'avalanches, la valeur minimale de  $30^\circ$  définit un seuil critique faisant consensus, notamment vis-à-vis de la pratique du ski de randonnée. Dans ce contexte en effet, les avalanches qui emportent des skieurs sont, pour la quasi-totalité, des cas d'avalanches de plaques. À l'inverse, les rares observations de départs d'avalanches dans des pentes d'inclinaisons plus faibles que  $30^\circ$  correspondent à d'autres types d'avalanches, le plus souvent des avalanches de neige mouillée. Cette valeur seuil de  $30^\circ$  apparaît d'ailleurs dans la brochure de sensibilisation et communication à destination des skieurs de randonnée *Attention Avalanches!* du SLF où l'on peut lire sur le graphique de la MRG : "*À partir de  $30^\circ$  = terrain potentiel d'avalanches*" [Harvey2018c]. De même, il y est désigné comme terrain typiquement avalancheux les pentes dont la déclivité est comprise entre  $35^\circ$  et  $45^\circ$  [Harvey2018c]. Schweizer et al. indiquent aussi qu'une pente d'inclinaison supérieure à  $30^\circ$  est généralement nécessaire au déclenchement d'avalanches de plaque [Schweizer2003]. Dans leur étude, Vontobel et al. se basent d'ailleurs sur un gradient de  $30^\circ$  et plus pour délimiter les zones de départ d'avalanches [Vontobel2013]. Enfin, Duclos, dans son cours de formation sur la gestion du risque pour l'ENSA<sup>2</sup> affirme que " *$30^\circ$  est l'inclinaison minimale nécessaire pour le déclenchement d'une plaque de neige sèche*". Les forces de traction augmentent en effet avec la pente et, en dessous de  $30^\circ$ , l'inclinaison de la pente n'est en général pas suffisamment importante pour que les forces de traction soient supérieures aux forces de résistance, notamment dans le cas de départs accidentels d'avalanches de neige sèche.

### 2.2.2 Décomposition du critère C2 Inclinaison des pentes

Nous présentons dans cette section la décomposition du critère C2 *Inclinaison des pentes*. Nous proposons de le décomposer comme suit, en sept sous-critères et quatre paramètres afin de prendre en compte l'ensemble des informations que nous jugeons utiles à sa bonne évaluation :

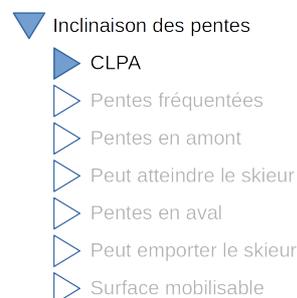
- C2.1 CLPA<sup>3</sup> ;
- C2.2 Pentés fréquentées ;
- C2.3 Pentés en amont ;
- C2.4 Peut atteindre le skieur, avec les paramètres C2.4<sub>1</sub> Dénivelé de pentés  $>30^\circ$  et C2.4<sub>2</sub> Distance horizontale ;
- C2.5 Pentés en aval ;
- C2.6 Peut emporter le skieur, avec les paramètres C2.6<sub>1</sub> Distance et C2.6<sub>2</sub> Inclinaison ;
- C2.7 Surface mobilisable.

Ces sous-critères, paramètres et leurs rôles sont explicités et justifiés ci-dessous.

D'abord, le sous-critère C2.1 CLPA, interroge la carte d'inventaire des phénomènes passés qui permet de conserver la mémoire d'événements historiques. Il permet d'évaluer si l'itinéraire envisagé par les skieurs se situe ou non dans une enveloppe d'avalanche historique recensée par la CLPA. Ce sous-critère est un indicateur direct, signifiant qu'un skieur se trouvant dans une enveloppe de la CLPA est menacé par de potentielles avalanches qui peuvent se déclencher et s'écouler directement dans la zone où il se situe.

Ce sous-critère pourra alors prendre les deux valeurs suivantes :

*Oui*, dans le cas où l'itinéraire traverse des enveloppes CLPA, *Non*, dans le cas contraire, i.e., soit parce que le skieur est, dans une zone ayant fait l'objet d'études CLPA, hors des enveloppes d'avalanches, soit parce qu'il traverse une zone n'ayant pas fait l'objet d'études CLPA, pour laquelle il



2. École Nationale de Ski et d'Alpinisme

3. Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche

est alors impossible de savoir s'il se trouve dans une enveloppe d'avalanche ayant eu lieu par le passé ou non.

Pour renseigner ce sous-critère, nous considérons les enveloppes issues de témoignages. Nous ne pouvons en effet pas ignorer les témoignages d'avalanches passées observées. Cependant, nous ne prendrons pas en considération les enveloppes issues des travaux de photo-interprétation puisqu'elles ne correspondent pas directement à des observations réalisées sur le terrain, mais sont issues d'un travail d'analyse supplémentaire (travail d'interprétation réalisé à partir de photo-aériennes). De ce fait, ces enveloppes sont le résultat d'un travail humain, susceptible d'être affecté par des biais. De même, nous ne nous baserons pas sur les indications fournies par l'EPA (Étude Permanente sur les Avalanches) puisque celles-ci ont davantage vocation à caractériser un secteur que les avalanches elles-mêmes ; l'EPA n'a pas vocation à dessiner des enveloppes d'avalanches, mais davantage à communiquer des seuils et conserver un suivi temporel en relevant chaque nouvelle occurrence observée sur de nombreux sites.

Notons qu'en France, la carte d'inventaire CLPA est accessible librement ([www.avalanches.fr](http://www.avalanches.fr)). Par ailleurs, ce sous-critère est potentiellement transférable à d'autres pays ou régions. En effet, en Italie, il existe par exemple un *cadastre régional des avalanches* pour le Val d'Aoste, issu d'un relèvement des avalanches par le *Bureau des avalanches*, dont une carte interactive est disponible en ligne (<https://mappe.regione.vda.it/pub/geovalanghe/?lingua=fr>). Sur le territoire helvétique, l'équivalent de la CLPA est géré par la *plate-forme commune d'information sur les dangers naturels*, nommée *GIN*. Cependant, cette plateforme n'est ouverte ni aux pratiquants ni aux guides de montagne.

Nous avons fait le choix actuellement de ne pas faire appel à la théorie des sous-ensembles flous pour décrire ce sous-critère ; l'incertitude qui l'affecte est difficile à estimer, et la précision supplémentaire que cela apporterait reste actuellement négligeable dans le système global au vu du nombre de paramètres et des effets de chacun sur le résultat final. Cependant, sa description floue pourrait être envisagée à l'avenir. Elle permettrait de prendre en compte une marge, donc une incertitude, sur le trait de contour des enveloppes d'avalanches. Le tracé de ces enveloppes est en effet basé sur des témoignages, ce qui le rend à la fois imprécis et incertain. De même, une autre source d'incertitude réside dans la difficulté à estimer les contours de l'aérosol induit par une avalanche de grande ampleur.

Ensuite, les premières estimations indiquées par la CLPA sont confrontées à l'étude de sous-critères complémentaires permettant de confirmer ou nuancer les premières indications obtenues. En particulier, puisque l'absence d'observation historique ne présage pas de l'absence d'événement possible dans le futur, dans les cas où le sous-critère *CLPA* prendrait la valeur *Non*, alors il est nécessaire d'évaluer le terrain, et avant tout l'inclinaison de la pente, afin de savoir si l'itinéraire envisagé par le skieur est exposé au danger. Cela est analysé par l'intermédiaire du sous-critère *C2.2 Pentes fréquentées* qui peut prendre deux valeurs de sortie possibles : *Pentes non-avalancheuses* et *Pentes avalancheuses* signifiant respectivement que l'inclinaison de la pente appartient soit à l'ensemble  $[0; 30] \cup [55; 90]$  soit à l'ensemble  $]28; 65[$ , avec deux plages certaines  $[0; 28[ \cup ]65; 90]$  et  $[30; 55]$  et deux plages incertaines  $]28; 30[$  et  $]55; 65[$ .

Pour fixer les bornes de la fuzzification du critère *C2.2 Pentes fréquentées*, nous avons fait le choix de considérer et de confronter les données de la littérature, et en particulier l'étude la plus récente [Veitinger2016a], et les experts du projet CIME (Duclos, Bonhomme). Pour la borne inférieure :

- les experts s'accordent avec Veitinger et al. sur la valeur de  $28^\circ$ , notamment du fait de l'incertitude de mesure ;
- les experts affirment que la valeur de  $35^\circ$  est trop optimiste, d'où l'adoption de la valeur seuil de  $30^\circ$ .

Bien que la valeur seuil de  $30^\circ$  fasse aujourd'hui consensus, il est en effet nécessaire de prendre une



marge d'erreur relative à l'imprécision de mesure de l'inclinaison d'une pente, tant via un Modèle Numérique de Terrain (MNT) qu'*in situ* grâce à un inclinomètre. Nous pouvons constater en général que les pentes dans lesquelles évoluent habituellement les skieurs de randonnée et les skieurs hors-piste sont comprises entre 20° et 40°. Au delà, la pratique s'oriente davantage vers une pratique dite de *ski extrême* et en deçà, il s'agit davantage de la pratique du ski nordique. Sur cette plage restreinte de 20°, chaque degré est important. Nous avons estimé qu'une erreur de 10%, soit 2°, est un bon compromis en terme d'imprécision de mesure. Nous avons donc exprimé le sous-critère C2.2 *Pentes fréquentées* de façon floue pour la plage de valeur 28° à 30° (voir Figure 2.2). Nous appliquons cette plage floue uniquement entre 28 et 30° (et non pas aussi entre 30 et 32°) afin d'adopter une vision prudente et sécurisée ; nous considérons ainsi qu'une pente mesurée à 31° ne peut pas appartenir au sous-ensemble flou *Pentes non-avalancheuses* (i.e.,  $\in [0; 30] \cup [55; 90]$ ) et appartient alors au seul sous-ensemble flou *Pentes avalancheuses* (i.e.,  $\in ]28; 65[$ ) avec un degré d'appartenance valant 1. À l'inverse, une pente de 29° appartiendra partiellement à chacun des deux sous-ensembles flous.

Nous avons ensuite caractérisé la fuzzification de la borne supérieure correspondant à la valeur au-delà de laquelle aucune avalanche ne peut plus se déclencher. Au delà d'une certaine inclinaison de pente, en effet, la neige ne peut plus s'accumuler de manière suffisante pour générer une avalanche. En revanche, tant que les pentes sont skiables alors elles accumulent de la neige. Ces dernières n'échappent pas aux règles générales qui affectent tout manteau neigeux, et une éventuelle avalanche peut s'y produire. La borne supérieure sera donc définie par la limite d'inclinaison des pentes skiables (signifiant la présence de manteau neigeux). Pour cette raison, nous avons interrogé Paul Bonhomme, guide de haute montagne et skieur de pente raide. Il fait actuellement parti de l'élite mondiale dans le cercle très fermé des pratiquants de ce sport extrême. Nous savons qu'il est en mesure de réaliser plusieurs virages successifs dans des pentes dont l'inclinaison est comprise entre 55° et 60°, et qu'il a pu réaliser un virage dans une pente de 65° (voir Figure 2.1). Au-delà, la raideur du terrain rend l'accumulation de neige impossible. Ainsi, dans les pentes d'inclinaison supérieure à 65°, aucune avalanche n'est susceptible de se déclencher. Cette inclinaison forme donc la borne supérieure du sous-critère C2.2 *Pentes fréquentées*. Les gammes de pentes intermédiaires décrites par Paul Bonhomme, de 55° à 65°, définiront alors la zone de transition floue dans les valeurs que peuvent prendre ce sous-paramètre ; peu de skieurs sont en effet en mesure d'évoluer dans ce type d'inclinaison (voir Figure 2.2).

Ainsi et pour résumer, pour caractériser la borne supérieure de la fuzzification du critère C2.2 *Pentes fréquentées*, nous avons à nouveau considéré et confronté l'étude la plus récente de la littérature [Veitinger2016a] et les experts du projet CIME (Duclos, Bonhomme) :

- les experts indiquent que la valeur de 45° est trop optimiste mais valident la borne de 55°,
- les experts affirment que la valeur de 55° reste optimiste pour la borne supérieure, d'où la fuzzification jusqu'à la valeur de 65°.

Notons que nous définissons le critère C2 *Pentes fréquentées* jusqu'à la valeur de 90° même si nous venons d'indiquer qu'aucune pente d'inclinaison supérieure à 65° ne devrait être skiée puisque la neige n'est pas en mesure de s'y accumuler. Dans le cadre du projet CIME, nous souhaitons que la méthode puisse être applicable à l'alpinisme, discipline sujette au risque d'avalanche puisque la pratique se décale progressivement vers le printemps et la fin de l'hiver. Ainsi, nous proposons une gamme de pentes en entrée pouvant s'élever à des inclinaisons supérieures aux inclinaisons skiables.

Bien que la grande majorité des avalanches se déclenche si l'inclinaison de la pente est supérieure à 30°, des zones d'inclinaisons plus faibles peuvent être affectées par les avalanches du fait de leurs écoulements. Ces dernières s'écoulent en effet jusque dans des pentes d'inclinaisons moindres. D'après la définition donnée par l'ACA<sup>4</sup> pour la *zone d'écoulement*, l'inclinaison de la

---

4. Association Canadienne des Avalanches

penne à cet endroit se situe entre 15° et 30° [ACA2015].

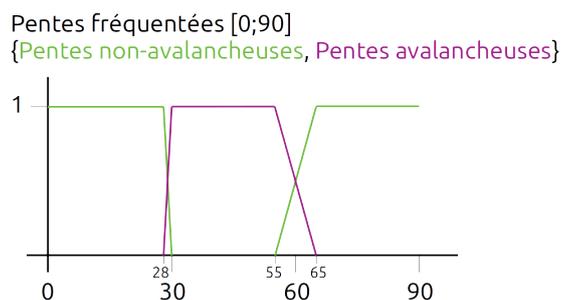


Figure 2.2 – Fuzzification du sous-critère C2.2 Pentes fréquentées

Ainsi, si le skieur n'est pas directement menacé par les pentes qu'il fréquente (i.e. itinéraire ne traversant que des pentes d'inclinaison inférieure à 30°), il est nécessaire d'évaluer s'il peut être atteint par une avalanche qui se déclencherait en amont. En effet, des avalanches sont susceptibles de se produire en amont du skieur, soit du fait d'un déclenchement à distance [Schweizer2001b] [Johnson2000], soit du fait d'un déclenchement par d'autres skieurs évoluant en amont, soit du fait d'un départ spontané.

- ▼ Inclinaison des pentes
  - ▷ CLPA
  - ▷ Pentes fréquentées
  - ▷ Pentes en amont
  - ▷ Peut atteindre le skieur
  - ▷ Pentes en aval
  - ▷ Peut emporter le skieur
  - ▷ Surface mobilisable

Ceci est analysé par le sous-critère C2.3 *Pentes en amont*, ce sous-critère étant similaire à celui analysant les pentes fréquentées par le skieur, les avalanches s'y déclenchant dans le même type de conditions. Ainsi, le sous-critère C2.3 *Pentes en amont* présente lui-aussi deux valeurs de sorties différentes, *Pentes non-avalancheuses* et *Pentes avalancheuses*, et sa fuzzification est la même que celle de C2.2 (voir Figure 2.2).

Si un déclenchement peut se produire en amont (i.e. si le sous-critère C2.3 *Pentes en amont* prend la valeur critique *Pentes avalancheuses*) alors il est essentiel d'évaluer si l'écoulement de l'avalanche peut atteindre la zone fréquentée par le skieur. C'est le sous-critère C2.4 *Peut atteindre le skieur* qui est alors questionné. Ce sous-paramètre peut prendre les trois valeurs de sorties *Oui (position dangereuse)*, *Position intermédiaire* et *Non (position sûre)*. Pour cela, il s'agit d'estimer la distance d'arrêt des avalanches. Des développements supplémentaires ont été nécessaires pour nous permettre d'estimer, en fonction de la distance d'arrêt des avalanches, si la position d'un skieur est sécuritaire ou non.

- ▼ Inclinaison des pentes
  - ▷ CLPA
  - ▷ Pentes fréquentées
  - ▷ Pentes en amont
  - ▼ Peut atteindre le skieur
    - ▷ Dénivelé de pente >30°
    - ▷ Distance horizontale
  - ▷ Pentes en aval
  - ▷ Peut emporter le skieur
  - ▷ Surface mobilisable

Ces travaux, qui ont conduit à l'extraction de deux paramètres permettant d'évaluer le sous-critère C2.4 *Peut atteindre le skieur*, sont présentés au Chapitre 3. Les deux paramètres permettant d'évaluer la situation sont les suivants : C2.4<sub>1</sub> *Dénivelé de pentes >30°* et C2.4<sub>2</sub> *Distance horizontale*.

Enfin, le skieur, même s'il ne fréquente que des pentes d'inclinaison inférieure à 30° et n'est pas menacé par les pentes qui le dominent, peut encore être emporté par une avalanche. En effet, une avalanche qui se déclencherait directement en aval de sa position peut être en mesure de le happer. Ce départ potentiel d'avalanche en aval est analysé par le sous-critère C2.5 *Pentes en aval*, ce dernier est équivalent aux sous-critères C2.2 *Pentes fréquentées* et C2.3 *Pentes en amont*, les avalanches s'y déclenchant dans les mêmes conditions. Ainsi, la fuzzification du sous-critère C2.5 *Pentes en aval* est la même que celles de C2.2 et C2.3 (voir Figure 2.2).

- ▼ Inclinaison des pentes
  - ▷ CLPA
  - ▷ Pentes fréquentées
  - ▷ Pentes en amont
  - ▷ Peut atteindre le skieur
  - ▷ Pentes en aval
  - ▷ Peut emporter le skieur
  - ▷ Surface mobilisable

Si un déclenchement peut se produire en aval (i.e., si le sous-critère C2.5 *Pentes en aval* prend la valeur critique *Pentes avalanches*) alors il est essentiel d'évaluer si le départ de l'avalanche peut happer le skieur. C'est le sous-critère C2.6 *Peut emporter le skieur* qui est alors questionné. De même que le sous-critère C2.4 *Peut atteindre le skieur*, C2.6 peut prendre les trois valeurs de sorties *Oui (position dangereuse)*, *Position intermédiaire* et *Non (position sûre)*. Ce sous-critère dépend quant-à lui de deux paramètres liés à la distance à la pente avalancheuse et à l'inclinaison de la pente où se trouve le skieur. Les deux paramètres permettant d'évaluer le sous-critère C2.6 *Peut emporter le skieur* sont les suivants :

C2.6<sub>1</sub> *Distance* et C2.6<sub>2</sub> *Inclinaison*. Les valeurs que peuvent prendre ces deux critères sont extraites sur la base d'une connaissance experte grâce à de nombreuses années de pratique sur le terrain de notre expert en nivologie. Il n'existe pas de base d'informations comprenant des situations de ce type (connaissance de la distance à la pente et de l'inclinaison de la pente dans laquelle une personne a pu se faire happer par une avalanche se déclenchant en aval de sa position), c'est pourquoi nous ne pouvons fuzzifier ces critères sur la base de statistiques tel que cela a été fait pour le sous-critère C2.4 *Peut atteindre le skieur* à travers les deux paramètres C2.4<sub>1</sub> et C2.4<sub>2</sub> évoqués ci-dessus.

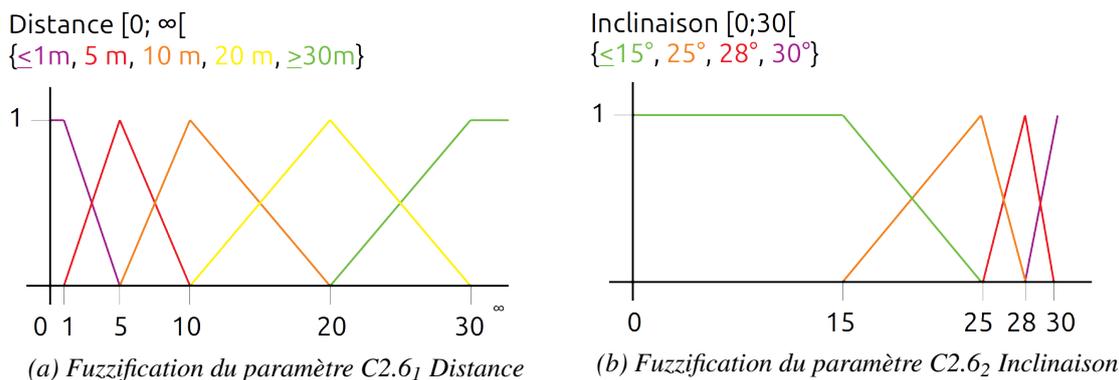


Figure 2.3 – Fuzzification des deux paramètres liés au sous-critère C2.6 *Peut emporter le skieur*

D'abord, notre expert distingue cinq situations de distance à la pente avalancheuse située en aval et quatre situations d'inclinaison de pente où se trouve le skieur. Pour ces différentes combinaisons, il estime la capacité de la pente à emporter le skieur. Sur la base de ces valeurs et pour traduire ces situations bien distinctes, nous avons fuzzifié les deux paramètres C2.6<sub>1</sub> et C2.6<sub>2</sub>. Le paramètre C2.6<sub>1</sub> peut donc prendre cinq valeurs graduelles qui permettent de traduire les valeurs suivantes :  $\leq 1$  m, 5 m, 10 m, 20 m et  $\geq 30$  m. Ces valeurs sont décrites de façon floue afin de traduire une gradualité du phénomène. Nous estimons qu'au-delà de 30 mètres, quelle que soit l'inclinaison de la pente, la distance est suffisamment importante pour que le skieur ne puisse pas être emporté. La fuzzification du paramètre *Distance* est présentée en Figure 2.3a. Ensuite, le paramètre C2.6<sub>2</sub> peut prendre les quatre valeurs graduelles suivantes caractérisant l'inclinaison de la pente où se trouve le skieur :  $\leq 15^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $28^\circ$  et  $30^\circ$ . Notons que ce paramètre est défini sur la plage de valeur  $[0, 30]$  car si le skieur se trouve dans une pente d'inclinaison supérieure à  $30^\circ$ , c'est le sous-critère C2.2 *Pentes fréquentées* qui fait sens, une avalanche pouvant directement se déclencher dans la pente où se trouve le skieur. La fuzzification du paramètre *Inclinaison* est présentée en Figure 2.3b.

Enfin, toutes les pentes n'étant pas en mesure de produire des avalanches de grande ampleur, il est nécessaire d'évaluer l'ampleur potentielle que pourrait prendre une avalanche se déclenchant dans les pentes considérées. Ceci est analysé uniquement du point de vue du terrain, i.e., du fait des prédispositions topographiques. Nous questionnons pour cela le sous-critère C2.7 *Surface mobilisable*. Ce dernier peut prendre les trois valeurs de sorties graduelles suivantes : *Nulle* (dans le cas où la pente n'est pas avalancheuse), *Faible* et *Grande*. Il s'agit alors d'estimer l'avalanche maximale que pourraient générer les pentes en cas de propagation efficace et continue d'une couche fragile (voir Section 2.6) sous des conditions nivo-météorologiques particulièrement critiques.

- ▼ Inclinaison des pentes
- ▷ CLPA
- ▷ Pentés fréquentées
- ▷ Pentés en amont
- ▷ Peut atteindre le skieur
- ▷ Pentés en aval
- ▷ Peut emporter le skieur
- ▷ Surface mobilisable

## 2.3 Observations d'avalanches récentes

### 2.3.1 Observations d'avalanches comme indicateur de danger

Tout d'abord, une observation d'avalanche récente est un très bon indicateur du niveau de danger en cours : des avalanches sont susceptibles de se produire à proximité, et dans les secteurs ayant rencontré le même type de conditions nivo-météorologiques, et notamment de précipitations. Ceci est en effet mentionné dans la littérature relative à la gestion du risque d'avalanche puisque les observations d'avalanches sont une preuve directe de l'instabilité du manteau neigeux [Lan-drø2020b], mettant en évidence la présence d'une couche fragile active dans ce dernier.

Si les observations d'avalanches sont donc un indicateur clef à la fois pour l'alerte, pour la gestion de crise et, de manière générale, pour la documentation sur les avalanches [Bühler2019], les informations restent cependant très ponctuelles. Elles sont en effet fournies par des observateurs sur le terrain. L'information et la connaissance des différentes occurrences restent donc éparpillées. Les renseignements sont alors limités, les observations étant plus ou moins bien documentées et les témoignages plus ou moins précis et fiables.

Il existe aujourd'hui des initiatives comme la base de données de [data-avalanche.org](http://www.data-avalanche.org)<sup>5</sup> qui permettent à tout un chacun de recenser les observations d'avalanches réalisées sur le terrain. Pour la base de données de [data-avalanche.org](http://www.data-avalanche.org), les pratiquants de la montagne ont accès à un formulaire de saisie leur permettant de renseigner leurs observations. Cela permet ensuite aux utilisateurs d'accéder aux informations enregistrées et de prendre connaissance de l'activité récente afin de la prendre en considération dans leur processus de détection et d'estimation du danger d'avalanche pour la prise de décision. Une telle base de données permet un accès à des informations pouvant être précises, même si toutes les occurrences d'avalanches observées ne sont pas systématiquement renseignées en détail par les observateurs. D'autres applications mobiles et outils permettent la collecte et le partage d'informations. L'application MountainNow permet de partager en temps réel des photos et commentaires d'observations faites en montagne. Elle permet alors l'identification et la géolocalisation de dangers précis, comme les observations d'avalanches. De même, l'application Mountain Hub offre la possibilité de partager des informations de diverses natures, dont des informations relatives à la neige (comme l'état de la neige, des tests du manteau neigeux ou encore des observations d'avalanches). Les données partagées peuvent ensuite être visualisées par le biais d'observations géo-étiquetées. ALP-RISK était une application dédiée à l'observation

---

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

des phénomènes naturels en montagne. Elle permettait la transmission de données via le partage d'observations d'événements (tels que des avalanches par exemple) à la fois aux pratiquants, mais aussi aux scientifiques et gestionnaires locaux. Aujourd'hui, cette application n'est plus active, mais elle a été remplacée par l'application web OBS-ALP, dédiée aux conditions et événements naturels en montagne. Elle permet donc le partage de différents types d'événements dont les avalanches de neige font partie.

Ces diverses applications sont participatives et fonctionnent sur l'échange qui permet à chacun de renseigner et consulter les informations.

Enfin, il existe d'autres sites communautaires (comme Camptocamp, en particulier avec sa base de données SERAC qui permet de partager des accidents et incidents en montagne ou encore Skitour) qui, bien qu'ils ne soient pas spécifiquement dédiés aux observations d'avalanches, permettent de renseigner les conditions rencontrées lors de courses en montagne et laissent donc la possibilité de donner de l'information sur l'activité avalancheuse.

Une piste envisagée pour augmenter la quantité d'informations disponible, sa fiabilité, sa précision et sa complétude est celle investiguée par Bühler et al. en 2019. Ils proposent une acquisition satellite pour identifier la localisation des avalanches [Bühler2019]. S'ils cartographient une période avalancheuse extrême sur les Alpes suisses, de telles techniques pourront peut-être, à terme, être davantage automatisées et généralisées pour renseigner les bases de données d'avalanches. D'autres travaux visant ces objectifs sont actuellement conduits à partir d'images satellites afin de développer des indicateurs spatialisés de l'activité avalancheuse sur les massifs de montagne. Dans ce contexte, une nouvelle méthode de détection automatique de débris d'avalanche a récemment été développée [Karas2022]. De manière générale, ces travaux ont pour objectif d'identifier et cibler les zones à risque et visent *in fine* à enrichir les bases de données actuelles.

Localement, pour enrichir une base de données d'observations, des travaux ont été envisagés dans le cadre du projet CIME. Ils relèvent de la possibilité de recueillir des observations d'avalanches à partir de drones. Grâce à des images des mêmes scènes captées à partir de différents points de vue et des techniques de photogrammétrie, les avalanches pourraient être reconstruites en trois dimensions, permettant d'obtenir des informations fiables et précises quant aux avalanches observées et leurs dimensions. Cependant, cela ne peut concerner que des secteurs ciblés, faisant l'objet d'investigations particulières, et ne serait pas généralisable, pour un instant  $t$ , à l'échelle des Alpes françaises ou de l'ensemble d'un massif montagneux, contrairement à ce que peut permettre l'analyse d'images satellites.

Dans la littérature, nous n'avons recensé aucune étude estimant quels secteurs ont des réponses similaires aux crues avalancheuses, et génèrent (ou présentent des conditions nivo-météorologiques susceptibles de générer) des avalanches de manière synchrone. Ainsi, aucune identification des étendues qui présentent des similarités en termes d'avalanches, donc au préalable en termes de conditions météorologiques rencontrées, n'a été conduite. Pourtant, une observation d'avalanche récente n'a pas de sens pour une étendue géographique illimitée, mais bien seulement pour un secteur géographique soumis au même type de conditions. Bien sûr, si le manteau neigeux présente une variabilité locale, avec des différences à quelques mètres près, nous faisons plutôt ici référence à une variabilité à large échelle : les massifs ne sont pas tous identiques en termes de précipitations reçues, et les conditions avalancheuses vont donc concerner, au même moment, les massifs les plus similaires. Il semble donc qu'un enjeu réside à l'avenir dans l'estimation des étendues qui connaissent des conditions similaires aux mêmes moments.

### 2.3.2 Décomposition du critère C3 *Observations d'avalanches récentes*

Au vu de l'importance de la prise en compte des observations d'avalanches récentes présentée dans la littérature et pour compléter leur évaluation, nous proposons que le critère C3 *Observations d'avalanches récentes*, pour être évalué, combine l'analyse de la criticité associée à chacune des observations d'avalanches récentes. Il fait donc appel à  $n$  sous-critères *Criticité* notés C3.1 à

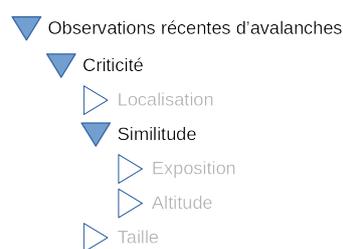
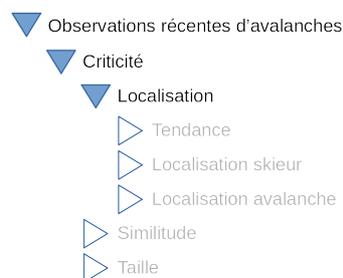
C3.n, n étant le nombre d'avalanches récentes observées. Nous employons le terme *criticité* pour traduire dans quelle mesure une avalanche observée sera un réel indicateur de danger par rapport à la zone fréquentée par le skieur. La criticité correspond donc à un niveau d'alerte. En effet, par exemple, des avalanches observées dans des zones très lointaines, ne rencontrant pas les mêmes conditions, n'ont aucun sens en tant qu'indicateur de danger pour le lieu fréquenté par le skieur. De plus, plus l'ampleur des avalanches observées est importante, plus elles correspondront à un indicateur critique, étant le signe que d'autres avalanches de grandes ampleur peuvent se produire. Chacun des sous-critères *Criticité* pourra prendre trois valeurs graduelles *Pas critique*, *Moyennement critique* et *Critique*. Pour être évalué, ce sous-critère fait appel à trois paramètres et huit sous-paramètres. Ils sont présentés ci-dessous sur la base de la notation propre au sous-critère C3.1 *Criticité* :

- C3.1<sub>1</sub> *Localisation*, paramètre faisant appel actuellement à trois sous-paramètres : C3.1.1.1 *Tendance météorologique*, C3.1.1.2 *Localisation skieur* et C3.1.1.3 *Localisation avalanche* ;
- C3.1<sub>2</sub> *Similitude*, avec les sous-paramètres C3.1.2.1 *Altitude* et C3.1.2.2 *Exposition* ;
- C3.1<sub>3</sub> *Taille*, avec les sous-paramètres C3.1.3.1 *Largeur pente*, C3.1.3.2 *Largeur avalanche* et C3.1.3.3 *Épaisseur avalanche*.

Tout d'abord, le paramètre C3.1<sub>1</sub> *Localisation* peut prendre les valeurs *Pas critique*, *Moyennement critique* et *Critique*. Il vise donc à estimer si l'avalanche observée fait sens par rapport au lieu fréquenté par le skieur (pour la raison évoquée ci-avant : si l'avalanche est lointaine ou n'a pas rencontré les mêmes conditions nivo-météorologiques, alors elle ne sera pas un indicateur de danger critique pour le skieur).

Pour développer ce paramètre, de plus amples travaux sont nécessaires afin d'estimer les étendues qui se comportent de manière similaire en termes d'activité avalancheuse. Cette étude doit porter sur les conditions préalables, telles que les précipitations, le vent, ou encore les variations de températures. Cependant, cette analyse est très complexe. Les premiers travaux développés à ce sujet sont présentés au Chapitre 3. Actuellement, l'analyse du paramètre C3.1<sub>1</sub> *Localisation* porte sur l'identification de la tendance météorologique ayant conduit à l'avalanche observée, ainsi que les localisations respectives des skieurs et de l'avalanche observée.

Ensuite, en plus de la localisation (qui porte sur l'analyse des zones géographiques présentant les mêmes conditions sur la base de facteurs nivo-météorologiques), nous intégrons ici la prise en compte de facteurs topographiques. L'objectif est d'évaluer la similitude entre la zone impactée par l'avalanche observée et la zone fréquentée par le skieur. C'est donc le paramètre C3.1<sub>2</sub> *Similitude* qui est interrogé. Il s'agit alors de comparer si l'avalanche récente observée a eu lieu dans des pentes exposées de la même manière (i.e., ayant la même orientation) et impactée similairement par les précipitations et températures (i.e., étant dans la même tranche d'altitude) que celles fréquentées par le skieur. Le paramètre C3.1<sub>2</sub> *Similitude* peut alors prendre les trois valeurs graduelles suivantes : *Nulle*, *Intermédiaire* et *Forte*. Il est issu de la combinaison de deux sous-paramètres préalables : C3.1.2.1 *Exposition* et C3.1.2.2 *Altitude*. Ces deux sous-paramètres n'ont pas encore fait l'objet d'investigations pour savoir comment les évaluer. Ils reposent sur la prise en compte d'informations complexes et nécessitent donc des études approfondies. Dans le cas de l'altitude, nous pouvons par exemple nous demander quelles seront les caractéristiques permettant de déduire que deux altitudes (celle de l'avalanche observée et celle fréquentée par le skieur) sont similaires ou non ? Il ne s'agit pas seulement de considérer une simple variation de l'altitude autour de l'observation pour déduire que l'altitude sera similaire ou au contraire différente ; il est par contre nécessaire d'intégrer la prise en compte de la limite



pluie-neige qui, selon son altitude, fera grandement varier les conclusions. Avec une limite pluie-neige située aux alentours de 2000 m, par exemple, les altitudes 1500 m et 2500 m sont très peu similaires, en revanche, pour une limite pluie-neige nettement plus basse (par exemple inférieure à 500 m), alors l'altitude n'aura que peu d'influence et ces deux élévations seront très similaires. De la même manière, l'estimation des similitudes liées à l'exposition fera aussi appel à plusieurs caractéristiques spécifiques. Par conséquent, ces deux sous-paramètres sont susceptibles de faire eux-mêmes émerger un niveau d'agrégation supplémentaire.

De plus, il est important de noter que le cadre permettant l'estimation du paramètre 3.1<sub>2</sub> *Similitude* est à considérer avec grande attention puisque le fait d'avoir une similitude prenant ou non la valeur *Nulle* aura une grande influence sur la valeur prise par le sous-critère C3.x *Criticité*.

Enfin, il est nécessaire de prendre en compte la taille des avalanches observées afin d'estimer la gravité de la situation. Les avalanches de petites tailles ne sont que peu alarmantes tandis que les avalanches de grandes ampleurs sont le signe d'une importante menace. Bien sûr, toutes les situations intermédiaires doivent être prises en compte et caractérisées pour estimer le danger en cours. Le paramètre C3.1<sub>3</sub> *Taille* pourra prendre les trois valeurs graduelles suivantes : *Pas alarmante*, *Moyennement alarmante* et *Alarmante*.



Comme présenté au Chapitre 1, il existe plusieurs échelles permettant d'estimer la taille des avalanches, et en particulier les échelles européenne et nord-américaine (R-scale pour les États-Unis et D-scale pour le Canada). Les explications et exemples présentés ci-dessous permettent de positionner nos choix pour la décomposition du paramètre *Taille* par rapport à ces différentes échelles.

Comme mentionné, l'échelle européenne porte sur un potentiel de dégât causé par l'avalanche, et communique quelques indicateurs supplémentaires propres à la taille typique d'une avalanche (longueur et volume). Avec la prise en compte du potentiel de destruction, l'échelle D-scale s'apparente à l'échelle européenne. Cependant, avec ce type d'échelle, une avalanche de grande ampleur (taille 5) ne sera possible que si le terrain le permet ; parfois, les caractéristiques du terrain (et notamment la largeur de la pente elle-même) ne permettent pas le développement d'avalanches de grande ampleur, mais seulement d'avalanches pouvant, au maximum, atteindre une taille de valeur moins importante sur l'échelle (taille 3 par exemple). Cependant, dans cette situation, une avalanche de taille 3, qui correspondrait donc au maximum qu'il est possible d'observer sur cette pente, correspond déjà à une avalanche alarmante. Nous pouvons en effet supposer dans ce cas qu'un terrain présentant des caractéristiques de dimensions supérieures, soumis aux mêmes conditions, sera susceptible de générer une avalanche de taille 4 voire 5 sur l'échelle européenne.

Au vu de ces considérations, le critère *Taille* ne doit pas avoir pour seul objectif de décrire et caractériser une avalanche observée, mais doit davantage viser à adopter un comportement prospectif (i.e., un comportement cherchant à pré-supposer des dimensions futures d'une éventuelle avalanche à venir dans des pentes voisines). Nous ne cherchons pas, en effet, à connaître les dimensions strictes d'une avalanche, mais à connaître le potentiel (en termes de taille d'avalanche) de la crue avalancheuse en cours et transférer les informations observées localement à d'autres pentes potentiellement plus imposantes. Il s'agit donc, à partir d'une observation d'avalanche récente, d'estimer si des avalanches similaires voire plus grandes sont possibles ailleurs.

L'échelle américaine (R-scale) compare l'avalanche observée à l'avalanche maximum potentielle que peut fournir un couloir d'avalanche. Elle considère pour cela la largeur de la zone de départ par rapport à la zone de départ potentielle ainsi que l'épaisseur de la plaque. De ce fait, si toute la zone part sur une épaisseur importante, alors le maximum de l'échelle sera atteint. En revanche, si une épaisseur plus faible se déclenche, la taille de l'avalanche ne pourra pas atteindre le maximum de l'échelle, même si l'ensemble de la zone de départ potentiel s'est déclenché [Birkeland2011]. L'exemple suivant permet d'explicitier davantage ces propos. Sur une pente de 50 m de dénivelé

et 100 m de largeur, l'avalanche maximale pouvant se déclencher aura un volume dont l'ordre de grandeur équivaut à une taille 2 sur l'échelle européenne. Cette dimension reste relativement petite (taille 2 sur 5). Cependant, au vu du site où elle s'est déclenchée, cette avalanche est alarmante puisqu'elle correspond au maximum observable. Elle est alors grande pour ce terrain où il est impossible d'observer des avalanches de taille 3, 4 ou 5. Ceci souligne donc l'intérêt d'une échelle telle que l'échelle américaine, plus adaptée à notre application (prospective et non descriptive). Avec l'échelle européenne, il est impossible d'obtenir une taille 5 sur ce terrain, pourtant la pente a fourni l'avalanche maximale qu'elle est en mesure de fournir, ce qui traduit la criticité des conditions nivologiques en cours. Ainsi, pour l'estimation du paramètre *Taille*, notre raisonnement s'approchera de celui de l'échelle R-scale et les valeurs prises, dans cet exemple, seront alors *Moyennement alarmante* voire *Alarmante* selon l'épaisseur mobilisée.

Au final, deux caractéristiques sont nécessaires pour générer des avalanches de grande ampleur :

1. d'importants volumes mobilisés,
2. une forte propagation de la rupture dans la couche fragile.

Ces caractéristiques sont évaluées de la manière suivante. D'abord, le volume mobilisable sous les conditions en cours est considéré par la prise en compte de l'épaisseur et de la largeur de l'avalanche. Contrairement à l'échelle européenne, nous ne souhaitons pas intégrer dans cette analyse la longueur de l'avalanche (davantage liée au dénivelé de pente parcouru et au profil de la pente qu'aux conditions nivo-météorologiques); ces données sont d'ailleurs prises en compte lors de l'estimation du critère propre à l'inclinaison des pentes (C2). Ensuite, la notion de propagation est renseignée par la prise en compte de la largeur de l'avalanche par rapport à la largeur totale potentielle que peut fournir la pente. Cela donne en effet une information sur le potentiel de propagation présent dans le manteau neigeux sous les conditions ayant conduit à l'avalanche observée. Le fait de considérer, comme l'échelle américaine, la largeur de l'avalanche par rapport au potentiel que fournit la pente (i.e., par rapport à la largeur de la pente) permet une estimation relative des caractéristiques de l'avalanche, ne donnant pas une valeur bornée par la dimension de la pente.

Pour résumer, afin d'estimer la taille d'une avalanche, nous ne cherchons pas à avoir une description stricte de la taille de l'avalanche observée, mais à caractériser le niveau d'alerte correspondant à la situation en cours. Nous souhaitons en effet déduire une estimation valable pour d'autres pentes dont le potentiel peut être plus important que celui où l'avalanche a été observé. Cela correspond à un travail prospectif puisque cette caractérisation est issue des caractéristiques de l'avalanche récente observée dans son contexte, bornée par le potentiel qu'offre la pente où elle s'est déclenchée. Ainsi, le paramètre C3.1.3 *Taille* fait appel aux trois sous-paramètres : C3.1.3.1 *Largeur pente*, C3.1.3.2 *Largeur avalanche* et C3.1.3.3 *Épaisseur avalanche*.

D'abord, la *Largeur pente* est définie à partir de trois valeurs distinctes explicitées par notre expert : les cas  $\leq 20$  m, 50 m et 500 m. Ces trois ordres de grandeurs graduels sont suffisants pour traduire les mécanismes qui entrent en jeu et caractériser les différentes situations possibles. La fuzzification de ce sous-paramètre est donnée en Figure 2.4.

Ensuite, pour la fuzzification du sous-paramètre C3.1.3.2 *Largeur avalanche*, au vu des informations expertes que nous avons recueillies, nous nous basons sur deux comportements distincts liés à la dimension de la pente considérée. En fonction de la largeur de la pente, la fuzzification de C3.1.3.2 *Largeur avalanche* sera alors différente. Pour une pente de 500 m de large, un départ d'avalanche de 200 m de large est déjà l'indicateur d'une très bonne propagation (la donnée est très informative sur le comportement du manteau neigeux). En revanche, pour une pente de petite dimension, une propagation partielle sera le signe d'une faible propagation de la rupture dans la couche fragile. Les pentes de petites dimensions (jusqu'à 20 m) donnent une information sur la



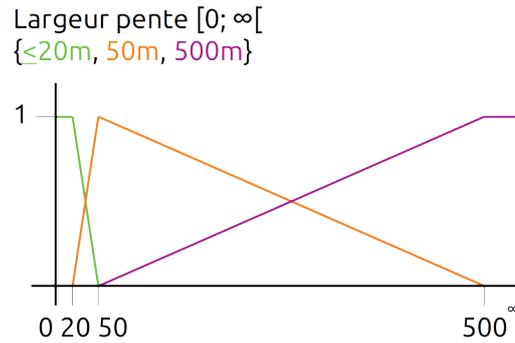


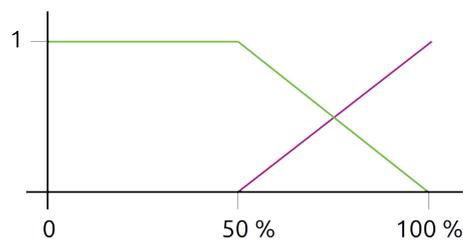
Figure 2.4 – Fuzzification du sous-paramètre C3.1.3.1 Largeur pente

propagation qui s'approche de celle observée par le biais d'un test nivologique. Nous en tirerons donc le même type de conclusions : soit l'avalanche se déclenche sur toute la largeur de la pente (bonne propagation), soit sur une largeur inférieure (caractérisant une propagation moindre). Le comportement sera alors le même pour toutes les pentes de dimensions inférieures ou égales à 20 m. Les valeurs de largeur de l'avalanche seront donc liées aux valeurs 100% et 50% estimées par rapport à la largeur de la pente (voir Figure 2.5a). Nous avons donc, dans ce cas, une fuzzification dynamique du sous-paramètre C3.1.3.2 *Largeur avalanche*, basée sur la largeur de la pente. Cette fuzzification sera celle utilisée lorsque le degré d'appartenance caractérisant la largeur de la pente vaut 1 pour le sous-ensemble flou  $\leq 20\text{ m}$ .

Les pentes de plus grandes dimensions, quant à elles, sont plus informatives, l'échantillon étudié étant de dimensions nettement plus significatives. La fuzzification du sous-paramètre C3.1.3.2 *Largeur avalanche* est alors extraite des différents cas, plus ou moins critiques, dégagés par notre expert (voir Figure 2.5b). Cinq cas progressifs (10 m, 20 m, 50 m, 100 m et  $\geq 200\text{ m}$ ) se combinant aux trois largeurs de pente possibles ont alors été dégagés. Le cas où la pente a une largeur de 20 m sert alors de cas limite.

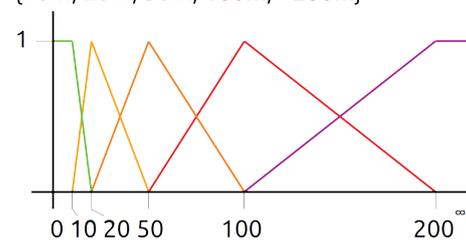
Ainsi et pour résumer, pour une pente inférieure à 20 m de large, la fuzzification est dynamique, tandis que pour des pentes de plus grandes dimensions, la fuzzification est tirée de cas concrets correspondant à des situations progressives tirées de la connaissance experte.

Largeur avalanche  $[0; x]$ , où  $x$  est la Largeur pente  
 $\{50\%, 100\%\}$ , pourcentages estimés par rapport à  $x$



(a) Cas d'une pente de largeur inférieure ou égale à 20 m

Largeur avalanche  $[0; \infty[$   
 $\{10\text{m}, 20\text{m}, 50\text{m}, 100\text{m}, >200\text{m}\}$



(b) Cas d'une pente de largeur supérieure à 20 m

Figure 2.5 – Fuzzification du sous-paramètre C3.1.3.2 Largeur avalanche selon la largeur de la pente

Notons qu'une perspective à ces caractérisations pourrait aussi résider dans la prise en compte de degrés de confiance plus ou moins importants accordés aux différents cas : les informations tirées d'une pente de 20 m étant moins informatives et fiables (pour être transférées à d'autres étendues) que celles issues d'une pente de grandes dimensions (de l'ordre de 500 m de large par

exemple).

Enfin, la fuzzification du sous-paramètre C3.1<sub>3,3</sub> *Épaisseur avalanche* est la même dans tous les cas distingués. La prise en compte de l'épaisseur de l'avalanche fait varier la possibilité ou non d'atteindre le maximum de l'échelle. Selon l'expert à nouveau, ce sous-paramètre peut prendre les valeurs :  $\leq 30$  cm, 50 cm et  $\geq 100$  cm (voir Figure 2.6).

La décomposition du critère C3 *Observations d'avalanches récentes* telle que décrite ci-dessus est basée sur la prise en compte des avalanches observées au cours des sept derniers jours. L'ensemble des avalanches observées dans ce laps de temps permet ainsi de fixer la valeur de  $n$ . Cependant, la durée qui caractérise le terme *récente* devra faire l'objet à l'avenir, d'investigations futures. En effet, après quelle durée sans avalanche peut-on exprimer le fait qu'il n'y a pas d'avalanche *récente* observée ? Pour répondre à cette question, il s'agit en fait d'estimer la discontinuité des observations d'avalanches. Cependant, la durée significative de cette discontinuité (exprimée en heures ou en jours) est variable selon la période de l'année, l'altitude ou encore le lieu. Ainsi, nous suggérons à l'avenir d'intégrer le caractère *récent* d'une avalanche dans l'évaluation de sa criticité. Une avalanche dépassant la durée estimée ne sera alors plus alarmante pour l'estimation de la situation en cours. Un paramètre supplémentaire, du type C3.1<sub>4</sub> *Récence*, visant à estimer le caractère récent des avalanches observées fait donc l'objet de perspectives de travaux futurs. Ce paramètre pourra alors lui-même faire appel à l'agrégation de plusieurs sous-critères. Il interviendra dans l'estimation de la criticité des avalanches et donc des sous-critères C3.1 à C3. $n$  *Criticité*.

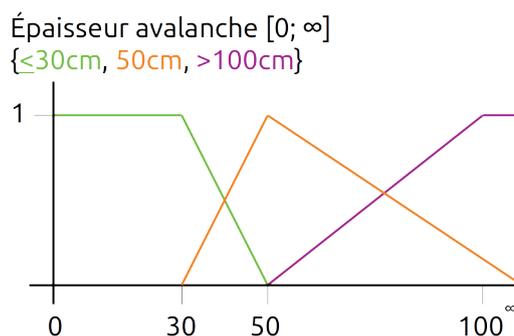


Figure 2.6 – Fuzzification du sous-paramètre C3.1<sub>3,3</sub> *Épaisseur avalanche*

## 2.4 Augmentation de température et fonte

### 2.4.1 Influence de la température sur le manteau neigeux

Il s'agit dans cette section de présenter l'état des connaissances relatives aux effets de la température sur le manteau neigeux.

Dès 1996, McClung et Schweizer ont montré que la température de la neige a une influence forte sur la stabilité des plaques de neige sèche, leur rigidité dépendant en effet de la température. Lors d'une diminution de la température (ils évoquent une variation de  $-2^{\circ}\text{C}$  à  $-15^{\circ}\text{C}$ ), la dureté ainsi que la résistance à la rupture augmentent [McClung1996]. À l'inverse, un réchauffement réduit la dureté de la plaque. La stabilité du manteau neigeux peut alors être réduite du fait du réchauffement de la neige dans la plaque, sans que la couche fragile ne soit elle-même affectée par l'augmentation de température. L'augmentation de température réduit donc la dureté

des couches supérieures, ce qui peut induire une déformation importante pouvant pénétrer plus profondément dans la neige [McClung1996]. Schweizer et Jamieson (en 2010) confirment que l'instabilité est plutôt due à un changement de propriété de la plaque (couche du manteau neigeux supérieure à la couche fragile) plutôt qu'un changement de propriété de la couche fragile elle-même [Schweizer2010a]. D'après ces auteurs, un changement de température de la neige affecte donc les propriétés mécaniques du manteau neigeux, a fortiori lorsque l'on s'approche du point de fusion [Schweizer2010a]. Cela confirme donc qu'une augmentation de température, y compris en l'absence de fonte, a déjà une influence sur la stabilité du manteau neigeux. Floyer et Bender dans le développement de Dangerator (méthode pour évaluer le risque local en l'absence de BERA) évoquent comme réchauffement critique une rapide augmentation de température jusqu'à proximité de 0°C, ou l'humidification de la surface du manteau neigeux du fait d'un fort ensoleillement, des températures de l'air au dessus du point de fusion ou de la pluie [Floyer2018]. Cependant, si les effets immédiats sont source d'instabilité, un effet retardé jouerait ensuite en faveur de la stabilité [Schweizer2003].

Plus qu'une simple augmentation de température, c'est la caractérisation du taux de variation qui a de l'importance sur le rôle de l'évolution de la température du manteau neigeux. [Schweizer2003] indique par exemple que "*l'augmentation de la température pendant une tempête et l'augmentation rapide de la température peu après une tempête contribuent à l'instabilité*". De même, dans le Dangerator, il est question d'une "*augmentation rapide de la température*" [Floyer2018].

Ainsi, les mots clefs qui émergent de la littérature sont donc : net, rapide, intense, ou encore nettement plus chaud. Ces termes sont en effet confirmés par l'application White Risk (un portail pour la prévention des avalanches, par la formation et l'aide à la préparation des courses en hiver en montagne) qui fait usage des termes "*net réchauffement*" et "*réchauffement net et rapide*". Il s'agit ici de termes linguistiques qu'il est nécessaire d'évaluer et traduire dans les sous-critères relatifs au critère C4 *Augmentation de température et fonte*. Pour estimer quelques ordres de grandeur, notre expert nous affirme qu'un passage de -10° à -3° provoque de l'instabilité; sur la plaquette de communication *Attention Avalanches!* du SLF on peut y lire un écart de l'ordre de 10° [Harvey2018c]; enfin, pour étudier la rigidité (phénomène inverse), McClung et Schweizer étudient un passage de -2°C à -15°C [McClung1996].

De plus, l'ensemble du bilan énergétique va finalement impacter la stabilité du manteau neigeux. Nous pouvons lire en effet, dans l'application White Risk qu'un fort rayonnement solaire augmente le danger d'avalanche. De même, le document de communication *Attention Avalanches!* souligne que le bilan est influencé par le rayonnement incident et émis ainsi que par le vent [Harvey2018c]. À ce sujet, [Schweizer2010a] indique même que "*le rayonnement serait plus efficace qu'un réchauffement rapide pour provoquer l'instabilité*". Ainsi, un réchauffement de la surface du manteau neigeux pourra être induit par un rayonnement solaire intense, mais aussi par des températures de l'air nettement plus chaudes que la neige, en particulier lorsqu'elles sont accompagnées d'un vent fort à modéré.

Notons enfin qu'au-delà des avalanches de neige sèche (provoquées lorsque la stratigraphie du manteau neigeux est de type plaque - couche fragile), une augmentation de température du manteau neigeux peut aussi générer des avalanches de neige humide, caractérisées par des départs ponctuels, qui forment alors des avalanches dites en forme de poire.

#### 2.4.2 Décomposition du critère C4 *Augmentation de température et fonte*

De manière simple et au vu de ce qui est présenté dans l'état de l'art, nous devons donc décomposer le critère C4 *Augmentation de température et fonte* en deux sous-critères permettant l'évaluation de ses deux composantes. De plus, il est nécessaire de considérer l'effet d'une croûte de regel dans le manteau, dont une épaisseur suffisante peut inhiber l'effet d'une augmentation de température. Nous obtenons alors les trois sous-critères suivants :

- C4.1 *Augmentation de température* ;
- C4.2 *Humidification* ;
- C4.3 *Épaisseur croûte de regel*.

Le premier sous-critère à prendre en compte, C4.1 *Augmentation de température*, vise à évaluer s'il y a eu une augmentation rapide de la température du manteau neigeux, afin d'estimer son effet sur la rigidité. Nous proposons que ce sous-critère puisse prendre comme valeur les degrés d'appartenance aux trois sous-ensembles flous suivants : *Non (aucun effet sur la rigidité)*, *Intermédiaire* et *Oui (effet sur la rigidité)*.

Ces trois sous-ensembles flous doivent être en mesure de traduire les variables linguistiques évoquées précédemment : "rapide", "net", "juste après", etc. Pour traduire ces notions, qui ne sont autres que des qualifications du langage, le sous-critère C4.1 *Augmentation de température* est alors susceptible de faire émerger un niveau d'agrégation supplémentaire, faisant appel à des paramètres préalables tels qu'une plage d'augmentation de température et une durée.

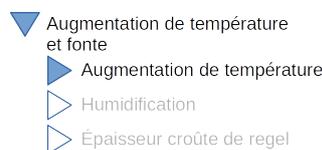
Le deuxième sous-critère à considérer, C4.2 *Humidification*, permet d'évaluer, dans le cas d'un réchauffement avec fonte, l'humidification du manteau neigeux. Cette humidification a un effet graduel sur la fragilisation du manteau neigeux, c'est pourquoi ce sous-critère pourra prendre les valeurs de sorties floues suivantes :

*Nulle, Petite, Moyenne* et *Grosse*. La description floue permet ici de prendre en compte la gradualité du phénomène. La mesure relative à ce paramètre correspondra à une mesure de la proportion d'humidification du manteau neigeux par rapport à la localisation de la couche fragile, soit le rapport entre la profondeur d'humidification et la profondeur de la couche fragile.

Notons que ce sous-critère sera aussi questionné en cas de pluie. Les précipitations provoquent en effet d'une part une surcharge (voir Section 2.5 ci-dessous) et induisent d'autre part une humidification du manteau neigeux, provoquant un effet déstructurant et sa fragilisation.

Le troisième sous-critère, C4.3 *Épaisseur croûte de regel*, permet de contrebalancer l'évaluation de l'augmentation de température. En effet, en présence d'une croûte de regel épaisse, l'augmentation de température va impacter en premier lieu la partie la plus superficielle du manteau neigeux, sans avoir d'influence en profondeur. Ce sous-critère prendra alors l'une des trois valeurs suivantes *Nulle, Fine* ou *Épaisse*.

Nous pouvons ajouter qu'au delà d'un certain stade (i.e., si elle est suffisamment importante et passé un certain délai), l'humidification du manteau neigeux peut avoir un effet positif. Nous avons vu dans la section précédente que les effets immédiats déstabilisent le manteau neigeux, tandis que des effets retardés contribuent ensuite à sa stabilisation. À ce titre, un sous-critère supplémentaire pourrait être pris en compte pour intégrer les effets positifs possibles de l'augmentation de température et fonte (critère C4.4 *Effet positif*). Nous faisons le choix, à ce stade, de ne considérer que les effets négatifs et de ne pas prendre en compte les facteurs réducteurs de risque.



## 2.5 Surcharges nouvelles

### 2.5.1 Surcharges du manteau neigeux

Nous pouvons d'abord souligner que l'effet de la surcharge du manteau sur sa stabilité est indéniable. Ceci est en effet bien illustré par les tests nivologiques. Lorsque la propagation de rupture dans la couche fragile est peu efficace a priori, il est souvent aisé de remarquer qu'elle est nettement aggravée lors de la surcharge de la zone de test.

En pratique, la surcharge du manteau neigeux peut être de plusieurs types : liée à la neige fraîche,

à la neige transportée par le vent (générant des accumulations) ou encore à la pluie.

Depuis les Quantités Critiques de Neige Fraîche (QCNF) proposées par Munter [Munter2003], des notions de surcharges critiques sont présentées dans la littérature. Munter, en 2003, décrit ces valeurs comme suit, considérant un cumul sur 1 à 3 jours :

- 10 à 20 cm par conditions défavorables,
- 20 à 30 cm par conditions moyennes,
- 30 à 60 cm par conditions favorables.

Ces valeurs ont été reprises dans la plaquette de communication *Attention Avalanches!* du SLF en 2018 [Harvey2018c] ; il y est cependant question de "30 à **50 cm** par conditions favorables". Le dépassement des QCNF induirait alors un danger d'avalanche au minimum marqué. D'après ces auteurs, les seuils critiques propres à la surcharge induite par la neige fraîche dépendraient donc des conditions.

Plusieurs valeurs, présentées dans la littérature, donnent un premier ordre d'idée qui permettra à l'avenir la détermination des valeurs des sous-ensembles flous exprimant la surcharge induite par la neige fraîche. Schweizer et al. expriment en 2003 les valeurs suivantes [Schweizer2003] :

- 1 m au cours d'une tempête est considéré comme critique pour induire des avalanches extrêmes,
- une valeur comprise entre 30 et 50 cm est généralement critique pour le déclenchement d'avalanches naturelles,
- des valeurs critiques plus faibles sont suffisantes pour le déclenchement d'avalanches par les skieurs. Ces auteurs se réfèrent aux publications de Munter pour évoquer que les seuils dépendent alors des conditions préalables à la chute de neige.

En 2012, Duclos propose lui aussi trois quantités graduelles donnant un ordre de grandeur caractérisant les surcharges de neige fraîche [Duclos2012] :

- < à environ 20 cm,
- environ 20 cm,
- > à environ 50 cm.

Il ne leur associe en revanche aucun lien avec les conditions (favorables, moyennes, défavorables). Plus récemment, Descamps et Moret (2016) ont eux aussi communiqué de telles valeurs qu'ils exploitent dans leur *grille d'estimation du danger local d'avalanche* [Descamps2016]. Ils décomposent alors l'évaluation des QCNF selon plusieurs seuils pour chacun des trois contextes (conditions favorables, moyennes et défavorables) évoqués par Munter (voir Table 2.1), ce qui leur permet d'estimer la situation (favorable, moyenne, défavorable, très défavorable). Leur proposition est alors plus finement décomposée, ne présentant pas seulement les QCNF mais trois valeurs graduelles. Pour leur évaluation, ils considèrent un cumul sur les trois derniers jours.

Au même titre que les précipitations neigeuses, la pluie joue elle aussi un rôle de surcharge du manteau neigeux. Cependant, à ce rôle s'ajoute un effet déstructurant, la pluie réchauffant le manteau neigeux et empruntant des canaux d'écoulement préférentiel dans ce dernier. Notons qu'un cm de neige est considéré comme équivalent à 1 mm de pluie [Munter2006] [Duclos, communication personnelle, 2019].

Ensuite, le transport de neige par le vent génère lui aussi des surcharges locales du manteau neigeux ; ces surcharges peuvent être rapides et les dépôts sont irréguliers, augmentant localement le taux de surcharge du manteau neigeux [Schweizer2003].

Ponctuellement sur les Alpes françaises, des mesures de transport de la neige par le vent sont disponibles et fournies par les capteurs FlowCapt (voir Chapitre 1, Section 1.1.1). Cependant, ces mesures sont ponctuelles et donnent un ordre de grandeur général de la neige déplacée par le vent, mais ne permettent pas de présager localement (i.e., à une échelle infra pente) des zones d'accumulations de neige par le vent. Ces stations de mesures peuvent servir d'avertissement (indiquant

	Surcharge	Évaluation de la situation
Contexte favorable	0 - 30 cm	favorable
	30 - 60 cm	moyenne
	> 60 cm	défavorable
Contexte moyen	0 - 20 cm	favorable
	20 - 30 cm	moyenne
	> 30 cm	défavorable
Contexte défavorable	0 - 10 cm	moyenne
	> 10 cm	défavorable
	> 30 cm	très défavorable

Tableau 2.1 – Évaluation des QCNF selon [Descamps2016]

la présence d'un transport de neige par le vent), mais ne peuvent pas présumer localement d'un danger certain pour l'utilisateur : son itinéraire intersecte-t-il effectivement des zones d'accumulation ? Si les stations de mesures FlowCapt permettent de donner une information générale, elles ne permettent donc pas la communication d'informations précises pour une pente donnée. D'un FlowCapt à l'autre, en effet, même proches, les valeurs enregistrées peuvent différer du fait d'effets locaux liés à la position précise des stations de mesures dans le massif, leur orientation et position au sein de la pente et par rapport au vent considéré. D'importantes différences locales se produisent en effet sous l'action du vent et une estimation précise sur le terrain reste donc nécessaire.

[Lehning2002] souligne aussi le fait que les capteurs de mesures de transport de la neige par le vent ne communiquent qu'une information ponctuelle et n'a donc pas de valeur pour l'estimation d'une surcharge sur une pente propice aux avalanches du fait d'influences locales (générant des différences importantes sur une même pente). Cela est donc d'autant moins valable pour caractériser l'ensemble d'un secteur.

Les modèles de transport de neige par le vent semblent être plus précis dans l'estimation des différences. Cependant, dans la publication portant sur le transport de neige par le vent disponible en ligne sur le site du Centre National de Recherches Météorologiques [CNRMB], il est évoqué à propos d'un modèle de transport de neige par le vent que "*la résolution horizontale de 50 m est insuffisante pour reproduire avec précision la localisation des zones d'érosion et de dépôt autour du Col du Lac Blanc*", ce qui prouve une fois encore que les différences de surcharge se font à une échelle infra-pente. Des variations fortes peuvent donc être observées sur une même pente avec des différences liées à l'effet du vent générant une érosion et redistribution à quelques mètres près. Ainsi, les performances des modèles restent limitées par leur résolution et s'ils permettent une estimation plus fine que celles permise par le maillage des stations de mesures sur le terrain, ils restent insuffisants pour estimer les différences locales, très fines à l'échelle d'une même pente.

Par contre, on peut lire dans [Mases1995] qu'il existe sur le terrain des zones d'accumulation préférentielles. Sur le site qu'ils étudient, les directions de vent perpendiculaires à la direction des crêtes sont les principales directions générant des accumulations, et ces dernières se localisent dans des zones d'accumulations préférentielles, qui se répètent d'un épisode à l'autre. Ainsi, les zones préférentielles d'accumulation et d'érosion par tel ou tel vent sur un site donné peuvent être peu à peu connus. De plus, des modèles permettant, à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) estival, d'extraire les informations du terrain hivernal (comme dans la procédure exploitée par [Veitinger2016b] permettant d'adapter un MNT estival en un terrain hivernal en considérant les hauteurs de neige et la direction principale du vent) pourraient être exploités afin de renseigner l'utilisateur à distance du terrain.

## 2.5.2 Décomposition du critère C5 *Surcharges nouvelles*

Sur la base de ce qui est présenté dans l'état de l'art ci-dessus, nous décomposons le critère C5 *Surcharge* en trois sous-critères permettant son évaluation :

- C5.1 *Vent*,
- C5.2 *Neige*,
- C5.3 *Pluie*.

Une surcharge nouvelle peut en effet être due à l'accumulation de neige par le vent, ou à l'arrivée de nouvelles précipitations, soit sous forme de neige, soit sous forme de pluie. Dans tous les cas, nous proposons que quatre valeurs graduelles constituent les sous-ensembles flous de chacun de ces sous-critères possibles pour caractériser la surcharge : *Nulle*, *Petite*, *Moyenne* et *Grosse*. Les définitions plus précises permettant de caractériser et évaluer ces sous-critères n'ont pas été développées à ce jour. Nos travaux se focalisent en effet davantage sur les critères C2 et C6, qui sont des éléments nécessaires au déclenchements des avalanches ou encore C3, qui est un très bon indicateur du danger en cours, plutôt que sur les critères C4 et C5, qui peuvent être davantage considérés comme des facteurs aggravants. Quelques pistes préliminaires sont tout de même suggérées ci-dessous.



Concernant le transport de neige par le vent, s'il peut être évalué directement par l'utilisateur, il pourrait aussi émaner de l'agrégation de plusieurs critères préalables. En effet, le transport et l'accumulation de neige par le vent dépendent à la fois de la vitesse du vent, de la cohésion de la neige de surface, mais aussi de l'exposition de la pente (au vent ou sous le vent). Cependant, ces données (notamment la mesure des vitesses) ne peuvent être obtenues que ponctuellement, et sont donc impactées par les difficultés inhérentes à l'extrapolation de mesures ponctuelles. Les modèles d'analyse de transport de neige par le vent pourraient être une deuxième façon de renseigner ce critère, à partir d'informations désormais surfaciques et non plus seulement ponctuelles. Enfin, nous pourrions envisager de pré-renseigner les zones d'accumulation de neige par le vent par la connaissance des zones préférentielles d'accumulation qui, d'après la littérature, sont toujours les mêmes. Une base de données pourrait alors être progressivement renseignée par les pratiquants (au même titre que la base de données contenant les observations d'avalanches) et recueillir les zones habituelles d'accumulation. Cela permettrait la prise en compte des redistributions locales, à l'échelle d'une même pente, qui ne peuvent être estimées que localement, soit par l'utilisateur, soit, éventuellement, par des modèles précis. Ces différentes propositions pourraient donc être exploitées afin de caractériser et évaluer dans le modèle global les valeurs associées à l'évaluation de la surcharge due au vent (critère C5.1 *Vent*).

Ensuite, concernant la neige fraîche, si l'on a vu dans la littérature que certains auteurs associent aux seuils critiques induits par la neige fraîche la prise en compte des conditions (favorables, défavorables ou intermédiaires), nous ne souhaitons pas l'intégrer aux sous-critère du critère C5 *Surcharges nouvelles*. Ces notions de conditions plus ou moins favorables se basent en effet sur la prise en compte du vent ou de la température. Elles se rapportent donc aux autres critères, ce qui est contraire à l'hypothèse d'indépendance entre les différents critères sur laquelle nous avons choisi de baser nos travaux. Ainsi, dans notre système, la surcharge doit être évaluée de façon indépendante ; ce sont les règles de combinaison des différents critères qui généreront ce lien (voir Chapitre 4). Pour la fuzzification du sous-critère C5.2 *Neige*, nous proposons alors de nous appuyer davantage sur un modèle simple, exploitant les valeurs proposées par Ducloux en 2012.

De plus, nous pouvons ajouter que l'effet de la surcharge par la neige est susceptible d'être dépendante du lieu. En perspective, la définition des différents sous-ensembles flous pourrait alors être variable et dynamique selon l'endroit considéré, i.e., que les seuils significatifs permettant de caractériser la surcharge et définir un sous-ensemble flou par rapport à un autre pourraient différer d'un massif à l'autre. Cette notion de surcharge par la neige, plus ou moins importante, serait en effet dépendante du fait que les pentes soient, au cours de la saison, régulièrement skiées ou non

[Duclos, communication personnelle, 2019].

Concernant la *Pluie*, il faut noter qu'elle fragilise les couches du manteau neigeux et que, d'après notre expert, quelle que soit la stratigraphie, elle aurait tendance à avoir le même effet partout. La pluie ne serait donc pas, quant à elle, variable selon le lieu.

Enfin, la pluie cumule les deux effets négatifs de la surcharge et de la fragilisation du manteau neigeux. Il s'agit donc, en plus de la surcharge qu'elle induit, de caractériser son effet destructurant. Cet effet déstabilisant est lié au réchauffement du manteau neigeux qu'elle induit, et donc à sa fonte et son humidification. Ce point sera, par conséquent, pris en compte par le biais du sous-critère C4.2 *Humidification du manteau neigeux* (voir Section 2.4.2). En cas de pluie, les deux critères C4 *Augmentation de température, fonte* et C5 *Surcharges nouvelles* seront donc directement concernés.

Pour la surcharge, comme pour les observations d'avalanches récentes, il s'agit de ne prendre en compte que les surcharges considérées comme *nouvelles*, donc *récentes*. À ce jour, nous considérons une durée de 48 heures pour la prise en compte des surcharges nouvelles. La littérature évoque en effet que les surcharges nouvelles seraient valables pour une durée de 48h, durée pouvant être allongée dans le cas de "*tempêtes puissantes*" [Floyer2018].

En réalité, l'évaluation de cette durée nécessite davantage d'investigations. La valeur des  $x$  heures à prendre en compte et qui fait sens pour exprimer le caractère *nouveau* d'une surcharge est susceptible de varier selon le lieu et la saison. Il s'agira alors d'estimer, selon la situation en cours, quelle durée fait sens pour évaluer si une surcharge est suffisamment nouvelle ou non pour être prise en considération. Dans ce cas, nous pouvons envisager la prise en compte d'un sous-critère supplémentaire du type C5.4 *Ancienneté* qui viserait à estimer si la surcharge observée fait sens ou non.

## 2.6 Couche fragile enfouie

### 2.6.1 Couche fragile et caractéristiques

La présence d'une couche fragile enfouie dans le manteau neigeux est une condition nécessaire (mais non suffisante) pour le déclenchement d'avalanches de plaque [Schweizer2003] [Louchet2020]. Pour générer une avalanche, une rupture doit être initiée dans la couche fragile et se propager jusqu'à induire le déclenchement. L'amorce et la propagation de rupture peuvent se produire sur un terrain plat [Heierli2008]. Cependant, le glissement quant à lui n'a lieu que dans des pentes dont l'inclinaison est suffisante, les forces de traction devenant supérieures aux forces de résistance (voir Section 2.2.1).

La littérature relative aux couches fragiles soulève notamment des réflexions sur l'impact de la couche fragile en fonction de caractéristiques telles que son épaisseur ou sa profondeur au sein du manteau neigeux. [Mccammon2002] [Kronthaler2006] et [Gaume2017b] ont étudié ces caractéristiques. Plus la couche fragile se situe à proximité de la surface du manteau neigeux et plus elle est susceptible d'être affectée par le passage d'un skieur (ce dernier pouvant amorcer une rupture dans la couche fragile par surpression ou du fait de ses skis) et générer l'instabilité du manteau neigeux. À l'inverse, au delà d'une certaine profondeur (et notamment au-delà d'un mètre), les contraintes s'exerçant sur la couche fragile sont moindres, augmentant la sécurité du skieur. Néanmoins, si ces informations sont très riches en théorie, la variabilité de la couche fragile (et principalement de sa profondeur) est trop importante en pratique. Du fait de l'irrégularité du manteau neigeux, il est impossible pour un skieur de connaître l'épaisseur de neige présente entre ses skis à la surface du manteau neigeux et la couche fragile, cette donnée pouvant varier à quelques mètres près. S'il semble intéressant de considérer la profondeur de la couche fragile et donc la variabilité du man-

teau neigeux, cela semble aujourd'hui davantage relever de l'utopie que d'une réelle perspective future, n'ayant pas de valeur opérationnelle. De plus, l'effet d'une couche fragile enfouie dans le manteau neigeux dépendra également de la présence et de l'épaisseur d'une croûte de regel.

Une autre caractéristique essentielle à considérer lors de la prise en compte d'une couche fragile enfouie dans le manteau neigeux pour l'évaluation du risque d'avalanche est son aspect continu ou discontinu. En effet, une couche fragile continue sera en mesure de produire de grandes avalanches, la propagation de la rupture pouvant s'étendre sur d'importantes distances. À l'inverse, la discontinuité de la couche fragile annihilera la propagation de la rupture. Cet aspect de continuité de la couche fragile s'étudie dans le manteau neigeux par le biais de tests nivologiques tels que le test de propagation à la scie (PST pour *Propagation Saw Test*, voir Chapitre 1). À ce sujet, le réseau ROMANs<sup>6</sup> a lancé une campagne saisonnière de tests nivologiques afin de fournir de l'information relative aux couches fragiles et par extension à l'activité avalancheuse, notamment lorsque celle-ci n'est pas encore avérée par la réalisation et l'observation d'avalanches récentes. Cependant ces informations souffrent, comme pour toutes données issues de campagnes de mesures, de son aspect ponctuel. Pour ne pas généraliser directement la valeur observée en un point à l'ensemble de la pente, voire de plusieurs pentes croisant l'itinéraire d'un skieur, de nombreux tests devraient être réalisés pour donner une véritable vue d'ensemble. Mais, cela nécessite un long temps de mise en oeuvre et n'est donc pas réalisable dans le cadre de la pratique du ski de randonnée. Kronthaler et Zenk proposent alors à ce sujet une phase d'*analyse mentale* qu'ils définissent comme le fait de "*reproduire en pensée les processus survenant dans la couverture neigeuse*" [Kronthaler2006]. Cependant, la principale limitation est que cette phase ne peut être réservée qu'à un public expert, capable d'estimer et interpréter les phénomènes passés et en cours. Ainsi, le transfert de l'information ponctuelle aux étendues adjacentes en matière de couche fragile enfouie dans le manteau neigeux peut s'avérer particulièrement difficile. Cela sera d'autant plus vrai pour le transfert d'informations plus distantes à la zone fréquentée par le skieur en cas d'absence d'information locale (i.e., dans la pente ou les pentes adjacentes). Bien que des travaux relatifs à l'extrapolation des informations disponibles puissent s'avérer nécessaires, la prise en compte de la présence d'une couche fragile enfouie dans le manteau neigeux ainsi que son caractère actif ou inactif sont des éléments essentiels dans l'évaluation du risque d'avalanche. Notre décomposition de ce critère est donc donnée ci-dessous.

## 2.6.2 Décomposition du critère C6 *Couche fragile enfouie*

À travers le critère C6 *Couche fragile enfouie*, il s'agit de savoir, localement, s'il y a présence d'une couche fragile enfouie efficace dans le manteau neigeux. En lien avec ce que nous avons présenté ci-avant, nous proposons que ce paramètre fasse appel à deux sous-critères, chacun respectivement basé sur deux et quatre paramètres :

- C6.1 *Présence*, avec les deux paramètres C6.1-2<sub>1</sub> *Type d'avalanches locales observées* et C6.1<sub>2</sub> *Couche fragile* ;
- C6.2 *Efficacité*, avec les trois paramètres C6.1-2<sub>1</sub> *Type d'avalanches locales observées*, C6.2<sub>2</sub> *Propagation (mesure)* et C6.2<sub>3</sub> *Propagation (caractérisation)*.

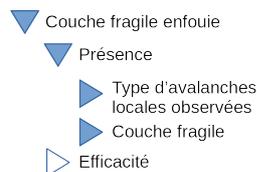
L'utilisateur a alors, en cas d'observations d'avalanches récentes, directement accès à de l'information concernant les couches fragiles enfouies dans le manteau neigeux. Notons que le critère *Type d'avalanches locales observées* est employé à la fois sur les sous-critères C6.1 *Présence* et C6.2 *Efficacité* d'où sa notation C6.1-2<sub>1</sub>. En effet, selon le type d'avalanches observées, l'information d'absence ou présence de couche fragile ainsi que son caractère efficace ou inefficace peut être directement déduit. Le paramètre C6.1-2<sub>1</sub> *Type d'avalanches locales observées* peut prendre

---

6. Réseau d'Observations et de Mesures Avalanches et Neige en secteur non sécurisé

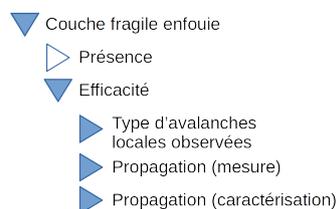
quatre valeurs différentes *Avalanche de plaque*, *Plaque de fond*, *Départ ponctuel en poire* ou encore *Pas d'avalanche observée*.

Dans un premier temps, le sous-critère C6.1 *Présence* est interrogé. Il peut prendre les valeurs suivantes : *Présence*, *Absence* ou *Indéterminée*. Deux critères permettent de renseigner ce sous-paramètre. D'abord, C6.1-2<sub>1</sub> *Type d'avalanches locales observées* est interrogé. S'il prend la valeur *Avalanche de plaque* alors C6.1 prend la valeur *Présence*; s'il prend la valeur *Départ ponctuel en poire* alors C6.1 prend la valeur *Absence*; sinon, s'il prend la valeur *Plaque de fond* ou *Pas d'avalanche observée*, alors l'information n'est pas directement connue et le paramètre C6.1<sub>2</sub> *Couche fragile* est interrogé. Dans le cadre de ce paramètre, c'est l'utilisateur lui-même qui doit choisir la valeur locale qu'il estime être correcte en ce qui concerne la couche fragile. C'est par l'intermédiaire d'un test du bâton ou d'un test de la colonne (CT pour *Column Test*, qui renseigne sur la désagrégation d'une couche fragile) qu'il obtiendra l'information lui permettant d'attribuer l'une des valeurs *Présence*, *Absence* ou *Indéterminée* (s'il n'arrive pas à conclure) au paramètre C6.1<sub>2</sub> *Couche fragile*. Ces valeurs sont alors directement transférées au sous-critère C6.1.



Dans un second temps et en cas de présence d'une couche fragile enfouie dans le manteau neigeux, il s'agit de questionner si cette dernière est efficace ou non. Pour cela, c'est le second sous-critère C6.2 *Efficacité* qui est interrogé. Il peut prendre les valeurs suivantes : *Inefficace*, *Faiblement efficace*, *Moyennement efficace* ou encore *Fortement efficace*. Pour étudier le caractère efficace ou inefficace de la couche fragile enfouie, plusieurs paramètres doivent être renseignés.

D'abord le paramètre C6.1-2<sub>1</sub> est appelé. S'il prend la valeur *Avalanche de plaque*, alors C6.2 prend la valeur *Fortement efficace*. Comme nous sommes dans le cas où C6.1 vaut *Présence*, alors C6.1-2<sub>1</sub> ne peut pas valoir *Départ ponctuel en poire*, ni *Plaque de fond*, ni *Pas d'avalanche observée*. Si C6.1-2<sub>1</sub> ne permet pas de fournir l'information, ce sont alors les deux autres paramètres (C6.2<sub>2</sub> *Propagation (mesure)* et C6.2<sub>3</sub> *Propagation (caractérisation)*), interrogés conjointement, qui permettent d'obtenir l'information. Notons que ces paramètres ne peuvent qu'être renseignés via la réalisation d'un test nivologique<sup>7</sup>. Les valeurs que peuvent prendre ces deux paramètres sont donc extraites à partir des résultats :



- d'un Test de Propagation à la Scie (PST pour *Propagation Saw Test*, voir Chapitre 1), dans le cas où une seule couche fragile a été mise en évidence par le CT ou dans le cas de neige de surface sans cohésion ;
- d'un Test de la Colonne Étendue (ECT pour *Extended Column Test*, voir Chapitre 1), dans le cas où plusieurs couches fragiles ont été mises en évidence par le CT.

En l'absence de réalisation d'un test, alors les deux paramètres prennent la valeur *Indéterminée* (*absence de test*). Dans ce cas, la valeur de C6.2 *Efficacité* sera alors elle aussi *Indéterminée*. Sinon, si un test est réalisé :

- C6.2<sub>2</sub> *Propagation (mesure)* peut prendre les valeurs *Négative*, *Faible*, *Moyenne* ou *Forte* ;

7. Pour se familiariser avec les tests nivologiques exploités dans ces travaux, le lecteur peut se référer aux nombreuses vidéos proposées par data-avalanche.org sur leur chaîne YouTube : <https://www.youtube.com/@dataavalanche6477/featured>. Plus précisément, la vidéo disponible au lien suivant <https://www.youtube.com/watch?v=UeE-Fu0F3wc> illustre l'identification des couches fragiles par un Test de la Colonne, puis les résultats d'un test de Propagation à la Scie d'abord sans surcharge puis avec surcharge, illustrant les différences de propagation induites dans la couche fragile. La vidéo disponible au lien suivant <https://www.youtube.com/watch?v=lud854NWNcC> illustre un Test de Propagation à la Scie avec propagation dans la couche fragile. Enfin, les vidéos suivantes présentent des Tests de la Colonne Étendue sans propagation <https://www.youtube.com/watch?v=Mw2dXQ08DX0> et avec une très forte propagation <https://www.youtube.com/watch?v=Pv8QuBPBJos>

- C6.2<sub>3</sub> *Propagation (caractérisation)* peut prendre les valeurs *Complète*, *Avec reprise* ou *Incomplète*.

Ces deux paramètres sont ensuite combinés par un système de règles afin d'obtenir la valeur de C6.2 (voir ci-dessous et Tableau 2.2).

Notons que le critère C6 *Couche fragile*, et en particulier le sous-critère C6.2 *Efficacité* ainsi que ses paramètres et les valeurs qui leurs sont attribuées à partir de tests nivologiques, a fait l'objet d'études conduites en parallèle de ces travaux dans le cadre du projet CIME. Ainsi, nous pouvons expliciter, en fonction des résultats des tests nivologiques, les valeurs attribuées aux paramètres C6.2<sub>2</sub> *Propagation (mesure)* et C6.2<sub>3</sub> *Propagation (caractérisation)*. Notons que ces paramètres ne sont pas décrits en faisant appel à la théorie des sous-ensembles flous puisqu'ils sont strictement estimés à partir des résultats des tests nivologiques.

D'abord, pour le paramètre C6.2<sub>2</sub> *Propagation (mesure)*, deux cas sont distingués selon que le test nivologique mis en œuvre soit un PST ou un ECT (voir ci-dessus).

- Dans le cas d'un ECT et si le test n'est pas négatif, la propagation dans la couche fragile peut soit se faire dès la découpe du bloc de neige pour réaliser le test, soit suite à un certain nombre de coups (surpression dynamique) donnés sur la colonne. Le paramètre C6.2<sub>2</sub> *Propagation (mesure)* prendra la valeur *Négative* dans le cas où l'ECT est négatif ainsi que dans le cas où un nombre de coups  $\geq 10$  a été nécessaire pour induire la propagation, *Faible* dans le cas où le nombre de coups nécessaire était compris entre 7 et 9, *Moyenne* pour 4 à 6 coups et *Forte* pour 1 à 3 coups ou une propagation dès la découpe.
- Dans le cas d'un PST et si le test n'est pas négatif, la propagation dans la couche fragile peut soit se faire, là encore, dès la découpe du bloc de neige pour réaliser le test, soit suite au sciage d'une fraction du bloc de neige isolé. Le paramètre C6.2<sub>2</sub> *Propagation (mesure)* prendra la valeur *Négative* dans le cas où le PST est négatif, *Faible* dans le cas où la fraction de bloc sciée pour générer la propagation est de 2/3, *Moyenne* dans le cas où la portion sciée est de 1/2 ou 1/3 et *Forte* dans le cas où la portion sciée est inférieure ou égale à 1/4 ou pour une propagation dès la découpe.

		Valeurs de C6.2 <sub>3</sub> <i>Propagation (caractérisation)</i>		
		Complète	Avec reprise	Incomplète
Valeur de C6.2 <sub>2</sub> <i>Propagation (mesure)</i>	Forte	Fortement efficace	Moyennement efficace	Faiblement efficace
	Moyenne	Moyennement efficace	Faiblement efficace	Inefficace
	Faible	Faiblement efficace	Inefficace	Inefficace
	Négative	Inefficace	Inefficace	Inefficace

Tableau 2.2 – Valeurs prises par le sous-critère C6.2 *Efficacité*

Ensuite, pour les deux types de test, le paramètre C6.2<sub>3</sub> *Propagation (caractérisation)* prendra la valeur *Complète* si la rupture s'est propagée à l'ensemble du bloc isolé, *Avec reprise* si la rupture ne s'est propagée que dans une partie du bloc mais s'est ensuite propagée à l'ensemble du bloc (en donnant des coups supplémentaires dans le cas de l'ECT ou en poursuivant le sciage dans le cas du PST), ou *Incomplète* si la rupture ne s'est propagée que dans une partie du bloc sans reprise. Enfin, les valeurs prises par le sous-critère C6.2 *Efficacité*, lorsque ce dernier est estimé à partir des deux paramètres C6.2<sub>2</sub> et C6.2<sub>3</sub>, sont celles décrites dans le Tableau 2.2.

## 2.7 Synthèse

À ce stade, nous disposons de la vision complète des critères, sous-critères et paramètres telle qu'établie à l'heure actuelle pour expliciter les critères principaux issus des situations typiques d'avalanche et intervenant dans la démarche CRISTAL. Le tableau 2.3 illustre cette vision d'ensemble. La Figure 2.7 en donne une version simplifiée, présentant les critères et sous-critères. Chacun de ces éléments est à évaluer pour mettre en œuvre le système d'aide à la décision développé dans ces travaux. Ils doivent ensuite être combinés afin d'obtenir progressivement la valeur de sortie des critères principaux. C'est enfin la combinaison de ces critères qui permettra l'estimation du mode de vigilance obtenu en sortie de la phase de détection de la démarche CRISTAL.

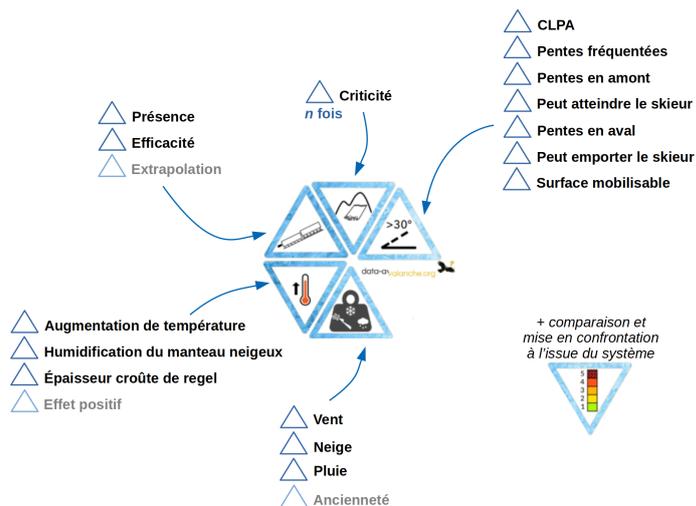


Figure 2.7 – Synthèse illustrée de la décomposition des critères en sous-critères

En ce qui concerne les critères C4 *Augmentation de température, fonte* et C5 *Surcharges nouvelles*, nous avons extrait les sous-critères utiles à leur évaluation afin d'en donner une description théorique. Cependant, nous n'avons pas étudié et détaillé les niveaux supplémentaires qui peuvent s'avérer nécessaires à leur évaluation, niveaux qui résulteront de travaux futurs, non conduits dans cette thèse.

De la même manière, des niveaux supplémentaires pourront être nécessaires à l'évaluation des paramètres relatifs aux *Observations d'avalanches récentes*, notamment en ce qui concerne les paramètres C3.1<sub>1</sub> *Localisation* et C3.1<sub>2</sub> *Similitude*. S'ils ont été décomposés en sous-paramètres, leurs développements restent limités et devront faire l'objet de futurs développements.

De façon similaire, le sous-critère C2.7 *Surface mobilisable* n'a pas fait l'objet de décomposition en paramètres voire sous-paramètres permettant son évaluation. Ceci s'explique par le fait qu'il n'ait émergé que dans un second temps (voir Chapitre 4).

À plus long terme et comme mentionné au cours de ce chapitre, des éléments supplémentaires pourront intégrer le système. Nous pouvons citer par exemple, à la manière du paramètre C3.1<sub>4</sub> *Récence*, la prise en compte du caractère *nouveau* de la surcharge du manteau neigeux (nécessitant la caractérisation de la durée qui fait sens pour l'estimer, voir Section 2.5.2), ou encore la prise en compte de facteurs positifs (tels que l'on peut en observer à travers les effets retardés de l'humidification du manteau neigeux, voir Section 2.4.2).

De même, l'évaluation du critère C6 *Couche fragile enfouie* telle que décrite en Section 2.6.2 correspond à une évaluation locale. Cependant, en cas d'absence d'informations locales (avalanche observée à proximité, test nivologique réalisé sur place), une extrapolation à partir d'informations plus éloignées pourra s'avérer nécessaire. Elle peut alors s'établir dans le système par l'interrogation d'un sous-critère additionnel du type C6.3 *Extrapolation*. Ce dernier fera alors l'objet de

Critères	Sous-critères	Paramètres	Sous-paramètres	...
Inclinaison des pentes	CLPA	/	/	/
	Pentes fréquentées	/	/	/
	Pentes en amont	/	/	/
	Peut atteindre le skieur	Dénivelé de pente >30°	/	/
		Distance horizontale	/	/
	Pentes en aval	/	/	/
	Peut emporter le skieur	Distance	/	/
		Inclinaison	/	/
Surface mobilisable				
Observations d'avalanches récentes	$n \times$ Criticité	Localisation	Tendance météorologique	
			Localisation avalanche	
			Localisation skieur	
		Similitude	Altitude	
			Exposition	
		Taille	Largeur pente	/
	Largeur avalanche		/	
	Épaisseur avalanche		/	
	Récence			
	Augmentation de température, fonte	Augmentation de température		
Humidification du manteau neigeux				
Épaisseur croûte de regel				
Effet positif				
Surcharges nouvelles	Vent			
	Neige			
	Pluie			
	Ancienneté			
Couche fragile enfouie	Présence	Type d'avalanches locales observées	/	/
		Couche fragile	/	/
	Efficacité	Type d'avalanches locales observées	/	/
		Propagation (mesure)	/	/
		Propagation (caractérisation)	/	/
	Extrapolation			

/ : aucun ; Cellule vide : non investigué, niveau(x) supplémentaire(s) potentiel(s)

n : nombre d'observations d'avalanches récentes

xxx : perspective d'intégration d'un sous-critère ou paramètre supplémentaire

Tableau 2.3 – Synthèse de la décomposition des critères

perspectives futures.

De plus, les facteurs humains tout comme les conséquences d’être emporté par une avalanche (liées notamment aux pièges du terrain), qui sont des éléments pris en compte dans plusieurs méthodes d’aide à la décision existantes, ne sont pas pris en considération dans notre explicitation des six critères principaux de la démarche CRISTAL. Comme évoqué au Chapitre 1, la démarche CRISTAL présente les différentes phases de détection, d’analyse et de décision qui sont propres à une véritable méthode d’aide à la décision (Figure 2.8). Dans ce cadre, nous avons choisi que le premier temps (i.e., la phase de détection) corresponde à l’estimation objective de la situation, basée sur les critères nivo-météorologiques et topographiques. Ce n’est donc que dans la phase d’analyse, questionnant les possibilités d’évitement et de réduction du risque, que ces facteurs humains devront intervenir. Pour citer un exemple, il semble essentiel en pratique d’analyser la possibilité qu’a un skieur de s’échapper en cas de déclenchement d’une avalanche, ou encore de considérer les pièges du terrain, pouvant aggraver la situation. Cependant, le fait de pouvoir s’échapper n’est autre qu’une réduction du risque, cette étape apparaissant en phase d’analyse de CRISTAL (Figure 2.8). Par ailleurs, les pièges du terrain sont susceptibles de compliquer l’échappement du skieur. Ces facteurs n’ont donc pas leur place dans la phase de détection de CRISTAL, basée sur les six critères principaux présentés dans ce chapitre, mais sont dépendants du niveau du groupe et donc des facteurs humains, facteurs intervenant dans la phase d’analyse prenant en compte les capacités d’évitement et de réduction du risque dont dispose le skieur.

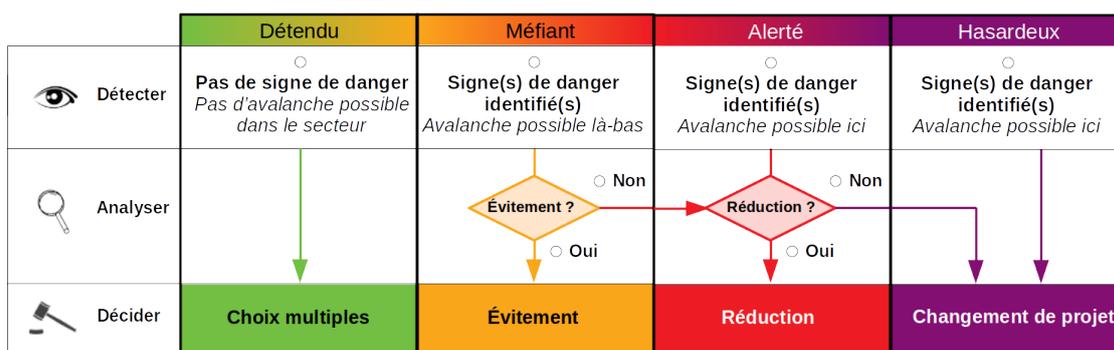


Figure 2.8 – Détecter, analyser, décider : trois phases de la démarche CRISTAL

Pour résumer, si nous ne sommes à ce stade pas en mesure de proposer des cadres stricts à l’évaluation de l’ensemble des éléments explicités dans ce chapitre, nous disposons a minima de l’explicitation théorique de l’ensemble du système. Certains sous-critères ou paramètres devront, en effet et comme évoqué, faire l’objet de travaux futurs pour être évalués.

Comme mentionné, le Chapitre 3 présente les études menées pour l’estimation des paramètres C2.4<sub>1</sub> *Dénivelé de pente >30°* et C2.4<sub>2</sub> *Distance horizontale* (intervenant dans l’évaluation du sous-paramètre C2.4 *Peut atteindre le skieur*, relatif au critère C2 *Inclinaison des pentes*) ainsi que les premiers développements utiles à l’estimation du paramètre C3.1<sub>1</sub> *Localisation*, relatif au critère C3 *Observations d’avalanches récentes*. Si ce dernier paramètre doit encore faire l’objet de développements à venir, le critère C2 *Inclinaison des pentes* en revanche a fait l’objet de l’ensemble des développements nécessaires pour être exploitable de bout en bout (i.e., sur l’ensemble des niveaux d’agrégation qui lui sont propres) et de façon à être pris en compte en l’état dans le système global. Les autres critères, dont les développements sont actuellement plus limités, doivent être renseignés de façon experte pour être pris en compte dans le système global d’aide à la détection. La combinaison des différents paramètres, sous-critères et critères, en plusieurs niveaux d’agrégation constituant le système développé, sera présentée au Chapitre 4.

# 3

## Automatiser l'estimation des critères

---

*Ce chapitre termine de répondre à la première question de recherche : être capable d'estimer les valeurs que prennent les sous-critères et paramètres (présentés au Chapitre 2).*

*Il se concentre en particulier sur le sous-critère C2.4 "Peut atteindre le skieur" et le paramètre C3.x<sub>1</sub> "Localisation", deux éléments permettant l'estimation des critères principaux C2, C3, voire à plus long terme C6. Nous présentons ici les travaux relatifs à l'explicitation de ces deux éléments qui, n'étant pas seulement basés sur une connaissance experte, ont nécessité des développements supplémentaires.*

*Ce chapitre fournit donc, d'une part, une méthode d'estimation de la distance d'arrêt des avalanches dans les Alpes françaises pour pallier aux modèles existants inadaptés dans ce contexte. Il présente, d'autre part, le développement d'une première approche permettant de quantifier la zone d'influence d'une avalanche récente observée.*

---

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Distance d'arrêt des avalanches</b>	<b>74</b>
3.1.1	Modèles existants et leurs limites	74
3.1.2	Fuzzification de la distance d'arrêt des avalanches	75
<b>3.2</b>	<b>Avalanches récentes et localisation du danger, partie 1 : Le point sur la situation et les méthodes exploitées</b>	<b>85</b>
3.2.1	Avalanches récentes et variabilité	85
3.2.2	Apprentissage automatique	86
<b>3.3</b>	<b>Avalanches récentes et localisation du danger, partie 2 : Estimation de la criticité d'une avalanche du fait de la localisation</b>	<b>90</b>
3.3.1	Processus de classification multi-niveaux pour la détection de tendances météorologiques	90
3.3.2	Estimation de la criticité d'une avalanche associée à une situation	102

---

### 3.1 Distance d'arrêt des avalanches

Nous présentons dans cette section les travaux qui ont conduit à l'automatisation et à l'évaluation du sous-critère C2.4 *Peut atteindre le skieur* (lié au critère C2 *Inclinaison des pentes*) grâce aux deux paramètres C2.4<sub>1</sub> *Dénivelé de pentes >30°* et C2.4<sub>2</sub> *Distance horizontale* (voir Figure 3.1). Ce sous-critère (C2.4) vise à estimer si l'avalanche est en mesure d'atteindre le skieur. Pour les autres sous-critères liés au terrain et à l'inclinaison des pentes (voir Chapitre 2, Section 2.2.2), aucun développement important n'a été nécessaire ; ils sont basés sur la connaissance experte.

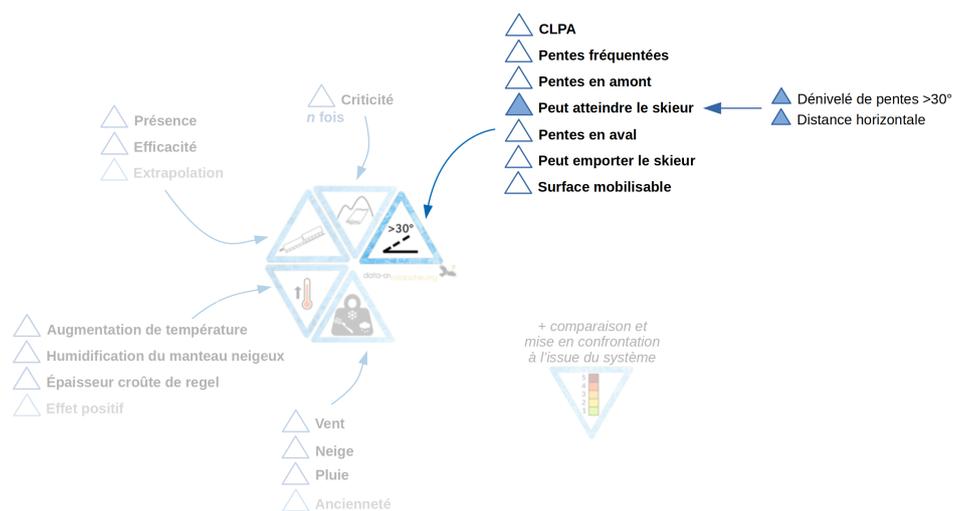


Figure 3.1 – Identification des critères, sous-critères et paramètres faisant l'objet de cette section

#### 3.1.1 Modèles existants et leurs limites

Dans la littérature relative aux avalanches, il existe deux types de modèles : les modèles dynamiques et les modèles statistiques (voir Chapitre 1, Section 1.1.3).

Les modèles dynamiques sont des modèles d'écoulement complexes s'appuyant sur de nombreuses données d'entrée. Comme l'indiquent [Jamieson2008], les résultats des modèles dynamiques sont associés à des incertitudes du fait de nécessaires simplifications auxquelles font appel ces modèles, et du fait des incertitudes qui entachent les paramètres d'entrée. On peut en effet lire dans la littérature que les résultats vont dépendre des conditions initiales (ie. des données d'entrée du modèle) et de la capacité du modèle à simuler précisément l'écoulement d'une avalanche. Il est nécessaire donc de bien évaluer les données fournies en entrée et les conditions aux limites pour avoir de bons résultats car de petites différences en entrées peuvent engendrer de grandes variations sur le résultat final ; il est donc souvent nécessaire de faire plusieurs scénarios pour trouver les conditions initiales les plus critiques [Veitinger2016b] [Stoffel2018]. Dans leur étude portant sur la modélisation des avalanches fréquentes et de petites tailles [Dreier2014], Dreier et al. exploitent le modèle dynamique RAMMS : EXTENDED [Bühler2014] [Christen2010]. Ils émettent cependant deux avertissements au sujet de ce modèle et ne recommandent pas l'utilisation de modèles numériques pour l'alerte d'avalanche en temps réel [Dreier2014].

Les modèles dynamiques sont donc majoritairement utilisés pour réaliser des zonages et évaluer les étendues maximales des avalanches en réalisant plusieurs simulations. Ces modèles sont en effet davantage orientés vers l'analyse des avalanches extrêmes que vers une utilisation en temps-réel pour l'estimation des avalanches les plus fréquentes.

Ainsi, si ces modèles présentent un réel intérêt scientifique, ils ne peuvent cependant pas être applicables en temps réel et pour une utilisation rapide dans le cadre de la pratique du ski de

randonnée sur le terrain. Pour cette raison et puisque nous cherchons à obtenir un modèle qui puisse satisfaire cette exigence, nous nous intéressons davantage aux modèles statistiques, basés sur un faible nombre de paramètres issus d'observations de cas réels. En particulier, nous nous sommes intéressés aux deux modèles les plus couramment utilisés : Alpha- Beta [Lied1980], et Runout-Ratio [McClung1991].

Le modèle Alpha-Beta, est un modèle statistique issu des travaux de Lied et Bakkehøi [Lied1980]. Il s'appuie sur un nombre réduit de paramètres topographiques afin d'estimer l'étendue maximale d'une avalanche. Il repose en particulier sur un angle appelé *angle alpha* (voir Figure 3.2). L'angle alpha représente le gradient moyen d'un couloir d'avalanche. Connaissant cet angle, lié au point le plus bas du dépôt d'avalanche, il est possible d'obtenir la distance maximale d'une avalanche. Pour une région donnée, ce modèle fournit une équation qui permet d'obtenir l'angle alpha en connaissant l'angle beta (voir Figure 3.2), l'angle beta étant spécifique à chaque couloir d'avalanche. De telles équations sont données pour plusieurs régions du monde, comme la Norvège ou le Canada. Ce modèle, bien adapté à certaines chaînes de montagne, n'est cependant pas applicable dans les Alpes françaises où le terrain est plus complexe (avec des changements d'orientation et des profils irréguliers comportant de nombreuses ruptures de pentes) [Ancey2001]. Adjel a appliqué cette méthode aux avalanches de la base de données de la CLPA de Haute Tarentaise. Il obtient alors la formule suivante [Adjel1995] :

$$\alpha = 0,78\beta + 3,39^\circ,$$

formule uniquement valide pour des dénivelés de moins de 500 mètres.

Cependant, le coefficient de corrélation valant  $R = 0,77$  est faible et insatisfaisant. Ceci montre qu'aucune corrélation linéaire de bonne qualité existe entre les deux angles alpha et beta en Haute Tarentaise.

De plus, la méthode alpha-beta considère l'unicité de l'angle beta pour un couloir d'avalanche. Cet angle est obtenu à partir du point beta (voir Figure 3.2), cependant, dans les Alpes :

- le point beta n'existe pas systématiquement (certaines avalanches ne l'atteignent pas, c'est le cas de 21% des sites étudiés par Adjel) [Adjel1995],
- il peut y avoir plusieurs points beta dans un même couloir (c'est le cas de 19% des avalanches étudiées) [Adjel1995].

Le modèle Runout-Ratio, issu des travaux de McClung et Mears [McClung1991] est donné par l'équation suivante [McClung2000] ( $\Delta x$  et  $X_\beta$  étant explicités en Figure 3.2) :

$$RR = \Delta x / X_\beta.$$

Ainsi, le modèle Runout-Ratio dépend lui aussi du point beta. Il est donc confronté, au même titre que le modèle Alpha-Beta, aux problématiques énoncées. Ces modèles n'étant pas adaptés aux Alpes françaises, nous avons alors cherché, dans nos travaux, à estimer une nouvelle distance d'arrêt maximale théorique valable dans ces massifs.

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

Dans ce chapitre, nous cherchons à estimer la distance d'arrêt des avalanches dans les Alpes françaises. Pour un même volume de neige, deux avalanches peuvent en effet avoir des distances d'arrêt différentes selon la configuration du terrain (pente large, couloir, ruptures de pentes, contre pentes). Ce phénomène très complexe ne peut qu'être simplifié pour être approximé. Cependant, l'expression d'une valeur seuil unique pour définir cette distance est trop stricte pour traduire la réalité physique qu'elle représente. Il en résulte donc l'expression d'un intervalle de distance et non d'une distance unique. De plus, la simplification du phénomène engendre des incertitudes.

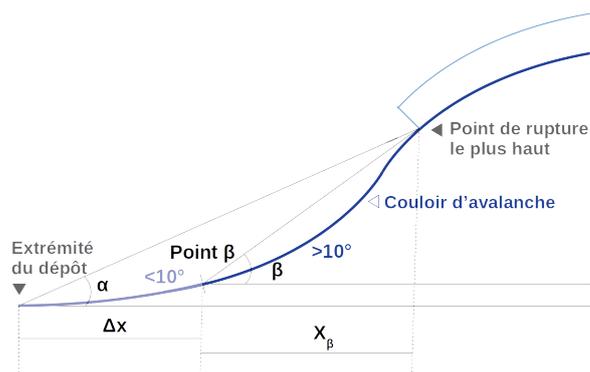


Figure 3.2 – Schéma représentant les métriques exploitées par les modèles Alpha-Beta et Runout-Ratio

Pour prendre en compte ces dernières, nous avons poursuivi l'utilisation de la théorie des sous-ensembles flous, comme pour les autres sous-critères présentés (voir Chapitre 2 et Annexe B). Nous avons alors souhaité décrire cette distance d'arrêt à travers un système flou. Pour ce faire, nous faisons donc appel, dans nos travaux, à une description floue (basée sur la logique floue [Zadeh1965] [Bouchon-Meunier2013] [Dubois2015]) pour estimer si la position d'un skieur est sécuritaire ou non lorsqu'il est dominé par des pentes susceptibles de produire des avalanches.

### Données et prétraitements

**Données exploitées.** Nous avons étudié 159 avalanches extraites de la base de données de 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 géoréférencé de leur emprise totale. Le terme *enveloppe* sera employé dans la suite de cette section pour faire référence à cette emprise. Une illustration de l'emprise d'une avalanche et son enveloppe sur une photographie est donnée en Figure 3.3. La Figure 3.5 montre des enveloppes d'avalanche reportées sur des cartes. Notons qu'un total de 159 avalanches reste un nombre faible pour une étude statistique, mais il est aujourd'hui difficile d'avoir des informations précises d'enveloppes d'avalanches mesurées au GPS. Sur les 4186 avalanches disponibles dans la base de données de data-avalanche.org, en effet, seulement 159 répondent à cette contrainte. Les avalanches qui composent la Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche (CLPA) sont quant à elles issues de témoignages ou d'un travail de photo-interprétation et la précision des tracés qui en résultent est donc trop faible pour cette étude.



(a) Photographie d'une avalanche sur le terrain, Dôme de Neige des Écrins, 21 mai 2021  
©Damien HAXAIRE



(b) Détournage de l'enveloppe de l'avalanche sur une photographie

Figure 3.3 – Emprise d'une avalanche : photographie et détournage de l'enveloppe

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

Les avalanches étudiées proviennent 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. 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.

À partir de ces enveloppes d'avalanches, nous avons extrait huit métriques différentes.

Pour palier aux problèmes cités précédemment quant au point  $\beta$ , nous avons construit nos métriques autour d'un point que nous avons appelé *point limite*, correspondant au point d'inflexion à  $30^\circ$  le plus bas. Sauf exception rare, ce point existe dans la totalité des avalanches puisque les pentes d'inclinaison supérieure à  $30^\circ$  comprises dans une enveloppe d'avalanche correspondent nécessairement à la zone d'écoulement et que l'avalanche décélère dans des pentes d'inclinaison plus faible. Les huit métriques exploitées sont alors les suivantes (Figure 3.4) :

- *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 limite ;
- *D*, le dénivelé de la pente supérieure au point limite ;
- *D'*, le dénivelé de la pente inférieure au point limite ;
- *d*, la distance plane entre le point de rupture le plus haut et le point limite ;
- *d'*, la distance plane entre le point limite et l'extrême limite du dépôt ;
- *D + D'*, le dénivelé total d'une avalanche, obtenu à partir des valeurs de *D* et *D'* ;
- *d + d'*, la distance plane totale de l'avalanche, obtenue à partir des valeurs de *d* et *d'*.

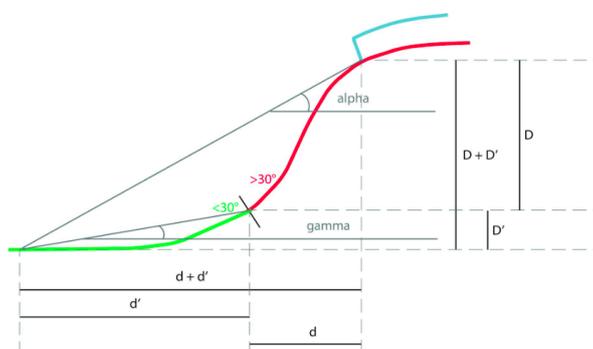


Figure 3.4 – Représentation schématique des différentes métriques calculées

Sur le même principe que celui du modèle Alpha-Beta, nous avons alors cherché l'existence d'une relation entre certaines de ces métriques.

Avant d'être en mesure d'extraire ces métriques, 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.

**Extraction du tracé central des avalanches et point limite.** Tout d'abord, quelques exemples de tracés centraux d'avalanches et points limites sont présentés en Figure 3.5. En amont du point limite (représenté en blanc), le tracé de l'avalanche est de couleur rouge, en aval, il est de couleur orange.

Ensuite, cette section décrit dans un premier temps le principe d'extraction du tracé central d'une avalanche à partir de son enveloppe. Ce principe a été automatisé de façon à être mis en

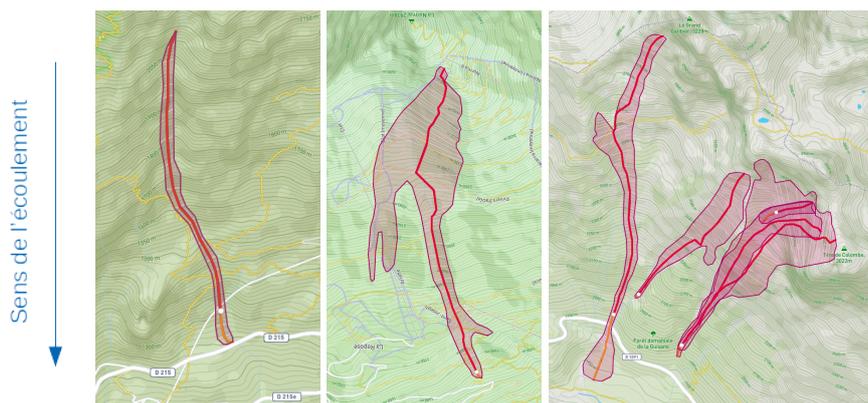


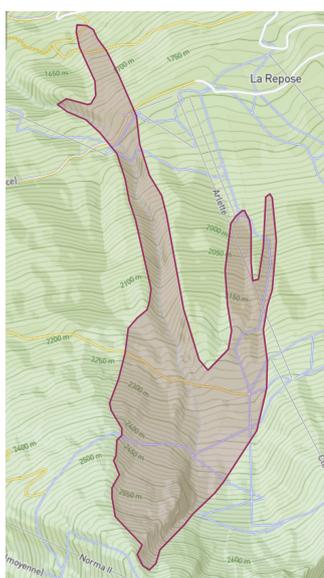
Figure 3.5 – Extraction du tracé principal d'une avalanche (rouge et orange) et point limite (blanc) : exemples

œuvre sur chacune des avalanches du jeu de données. Cette section décrit dans un second temps l'extraction du point d'inflexion à  $30^\circ$  le plus bas, que nous appellerons *point limite*. Ce point est nécessaire à l'extraction de chacune des huit métriques énoncées ci-avant.

Sachant qu'une enveloppe d'avalanche correspond à un ensemble de points GPS qui forme un polygone, nous avons établi le processus suivant :

- Extraction des 2 points d'altitude la plus haute et la plus basse les plus distants.
- Extraction de chacun des 2 côtés du polygone.
- Suppression des "imperfections" sur chacun des côtés du polygone (Figure 3.6) et extraction des points de l'enveloppe principale de l'avalanche (i.e. polygone sans "imperfections") (Figures 3.6b et 3.7a). Une vidéo détaillant le processus de suppression des imperfections pour un côté du polygone est visualisable à l'adresse suivante : <https://projects.listic.univ-smb.fr/cime/8d818c75-97a1-4372-9cae-f3b46572e442/>.
- Extraction des points de départ et d'arrivée de la trace centrale de l'avalanche (Figure 3.7b). Ces points correspondent respectivement au point central de deux sections de l'enveloppe sélectionnées avec une tolérance de 10 m autour du point le plus haut (zone à forte inclinaison) et 2 m autour du point le plus bas (zone à faible inclinaison).
- Extraction du point central de chaque courbe de niveau, courbes établies en chacun des points GPS de l'enveloppe (Figure 3.7c). Le tracé principal de l'avalanche alors extrait correspond à la ligne passant par chacun de ces points (Figure 3.7d).

À partir du tracé principal de l'avalanche, nous avons pu déterminer la position du point limite (Figure 3.8). Pour le déterminer, nous avons calculé l'altitude du tracé principal avec un pas de 1 m, permettant ainsi d'en extraire un profil altimétrique (Figure 3.8). Nous avons alors calculé l'inclinaison des pentes sur l'ensemble du profil afin d'obtenir la position du point limite. À ce stade, nous avons pu extraire chacune des métriques présentées précédemment (Figure 3.4).



(a) Enveloppe de l'avalanche

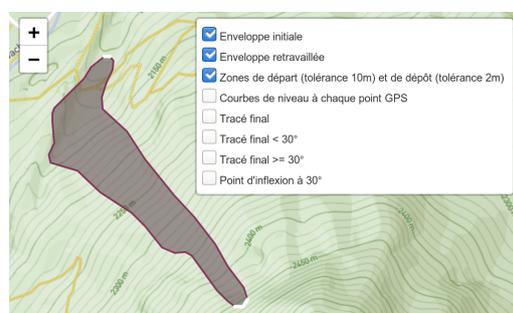


(b) Extraction de l'enveloppe principale

Figure 3.6 – Extraction de l'enveloppe principale d'une avalanche



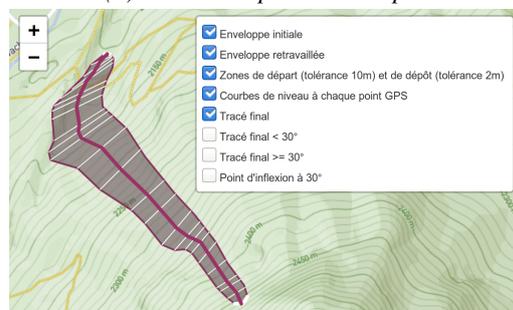
(a) Enveloppe principale



(b) Zone de départ et de dépôt

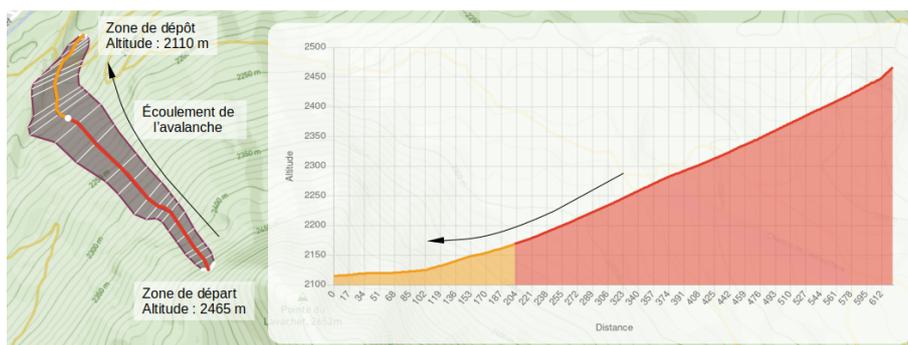


(c) Courbes de niveau



(d) Trace centrale

Figure 3.7 – Extraction du tracé principal d'une avalanche : principe



Tracé orange : portion de pente en dessous du point limite ; Tracé rouge : portion de pente au dessus du point limite.

Figure 3.8 – Extraction du point limite

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

**Relation entre les métriques étudiées.** Nous avons comparé deux à deux chacune des métriques et avons trouvé une relation linéaire (Figure 3.9) 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). À 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 d'inclinaison supérieure à  $30^\circ$  et s'est propagée sur une longue distance dans des pentes d'inclinaison juste inférieure 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 la même valeur de  $D$  mais associées à des pentes nettement plus raides que  $30^\circ$ ).

**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), il n'est pas raisonnable de 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 (Figure 3.9); 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 3.10). Dans le cadre de ces travaux, nous avons en effet choisi de conserver un modèle simple, facilement explicable aux professionnels de la montagne.

#### Formalisme de calcul des droites de régression linéaire

Nous considérons  $N$  observations avec  $N = 149$  (149 observations d'avalanches de 1999 à 2019).

Variable  $X$  : dénivelé de la pente supérieure au point limite (variable explicative),

Variable  $Y$  : distance plane totale de l'avalanche (variable à expliquer),

$M_i = (x_i, y_i)$  une observation, avec  $i = 1, 2, \dots, N$ .

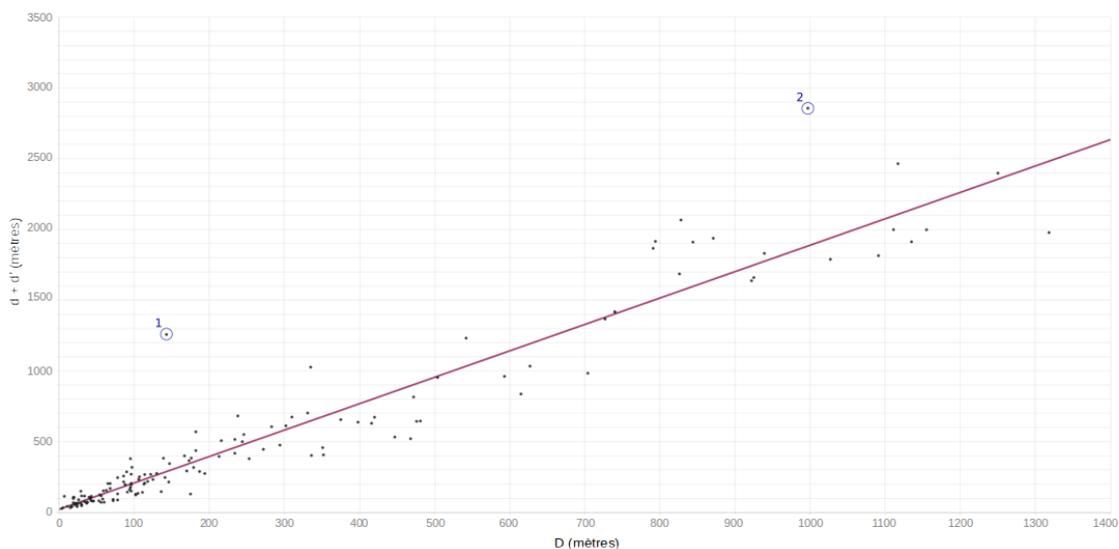


Figure 3.9 – Régression linéaire entre  $D$  et  $d + d'$

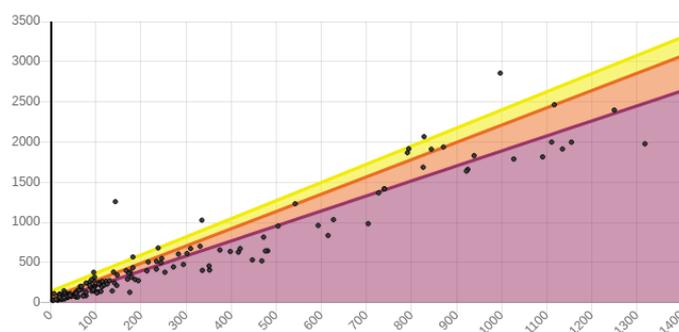
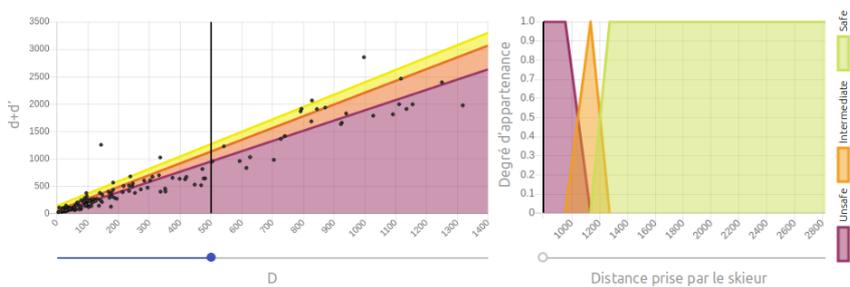
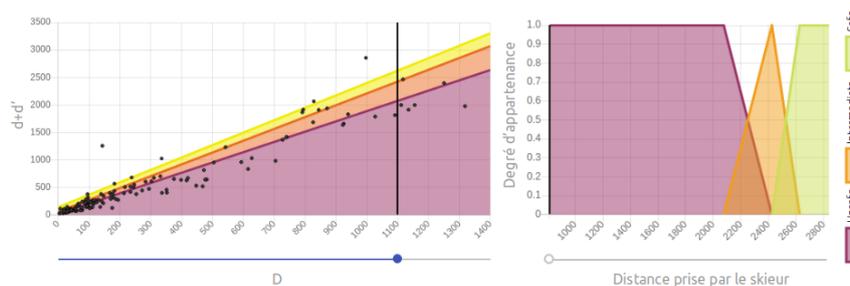


Figure 3.10 – Régressions itératives



(a) Cas où  $D = 500m$



(b) Cas où  $D = 1100m$

Figure 3.11 – Fuzzification dynamique de la distance d'arrêt des avalanches

La droite de régression est calculée par la méthode des moindres carrés : nous cherchons la droite pour laquelle la somme des carrés des écarts verticaux des points à la droite  $D$  est minimale.

### Principe de la régression calculée de manière itérative

1<sup>ère</sup> itération : calcul de  $D_1$  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  $D_1$  vérifie :  $y_{1,i} = a_1x_{1,i} + b_1$ .

2<sup>ème</sup> itération : calcul de  $D_2$  avec les points des observations  $M_i = (x_i, y_i)$  situés au-dessus de  $D_1$ , i.e., les points tels que  $y_i > y_{1,i}$ , avec  $y_{1,i}$  l'ordonnée à l'origine du point d'abscisse  $x_i$  sur  $D_1$ .

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  $D_3$  avec les points des observations  $M_i = (x_i, y_i)$  situés au-dessus de  $D_2$ , i.e., les points tels que  $y_i > y_{2,i}$ , avec  $y_{2,i}$  l'ordonnée à l'origine du point d'abscisse  $x_i$  sur  $D_2$ .

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 dont les valeurs sont plus élevées que celles de 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 sûre (i.e., de sécurité).

Nous avons jugé que trois itérations permettent d'englober la majeure partie des cas, sans pour autant devenir trop pessimiste. Cela serait le cas, à l'inverse, en cherchant à englober l'ensemble des points. Ainsi, seuls sept 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 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  $30^\circ$  qui domine 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 3.10, 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 a une très forte probabilité de se trouver 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 diminuant à mesure que l'on s'approche de la bordure haute de la zone jaune. 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 [Marsala1995] [Smits2017], 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 régression (violette, orange et jaune). L'incertitude qui en ressort concernant la distance d'arrêt est alors exprimée à travers une fuzzification dynamique, cette dernière évoluant en fonction de la valeur de  $D$  (Figure 3.11).

### Formalisme de la fuzzification de la distance d'arrêt des avalanches

Soit une valeur de  $D$  donnée et  $d + d'_v$ ,  $d + d'_o$  et  $d + d'_j$  les valeurs de  $d + d'$  obtenues respectivement sur les droites de régression violette, orange et jaune pour l'abscisse  $D$ .

Alors, les trois fonctions d'appartenance *unsafe*, *intermediate* et *safe* sont des fonctions continues, linéaires, strictement croissantes ou décroissantes sur les intervalles  $[d + d'_v, d + d'_o]$  et  $[d + d'_o, d + d'_j]$  et sont définies par les principales valeurs suivantes :

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

Cette fuzzification, permettant de décrire la distance d'arrêt des avalanches, 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 une valeur de  $D$  donnée, 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 première et troisième itérations, ou encore, comprise entre ces deux valeurs), la position sera respectivement exprimée comme 100% sûre (zone verte), 100% exposée (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 (correspond à la deuxième itération).

Prenons un exemple : dans le cas présenté en Figure 3.11a, le skieur est dominé par une pente d'inclinaison supérieure à  $30^\circ$  sur 500 mètres de dénivelé. S'il s'éloigne d'une distance planimétrique de 1000 mètres, il se trouvera alors dans une situation intermédiaire caractérisé par un degré d'appartenance de 0,75 au sous-ensemble flou *unsafe* et 0,25 au sous-ensemble flou *intermediate*. S'il augmente sa distance à 1250 mètres, sa distance sera plus sûre et les degrés d'appartenance seront alors de 0,16 et 0,84 respectivement pour les sous-ensembles flous *intermediate* et *safe*.

Ainsi, grâce aux valeurs attribuées aux deux paramètres C2.4<sub>1</sub> *Dénivelé de pentes >30°* et C2.4<sub>2</sub> *Distance horizontale*, i.e., respectivement  $D = 500m$  et  $d = 1000m$  puis  $d = 1250m$  pour les deux cas présentés ci-dessus, le sous-critère C2.4 *Peut atteindre le skieur* est évalué. Pour chacune de ses trois valeurs de sortie possibles : *Non (position sûre)*, *Position intermédiaire* et *Oui (position dangereuse)*, il prend respectivement les valeurs des degrés d'appartenance associées à chacun des sous-ensembles flous *safe*, *intermediate* et *unsafe*.

### Validation du modèle

Les travaux présentés ci-avant, conduits sur 149 enveloppes d'avalanches (obtenues en 20 ans d'observations et de mesures), ont permis le développement d'un modèle, adapté aux massifs alpins français, fuzzifiant la distance d'arrêt des avalanches. Dans cette section, nous présentons une validation des valeurs communiquées par le modèle grâce à une mise en application sur les 10 avalanches restantes dans le jeu de données, observées en 2020 et 2021 (soit sur deux années d'observations et de mesures).

En mettant en œuvre le modèle établi sur ces 10 nouvelles enveloppes, nous pouvons estimer si la fuzzification de la distance d'arrêt des avalanches dans les massifs alpins français est satisfaisante ou non. Pour cela, nous comparons les valeurs observées (donc attendues) aux valeurs estimées par le modèle. De plus, cela permet de mettre en évidence l'apport de la fuzzification par rapport à une description nette de la distance d'arrêt (obtenue par une unique régression linéaire).

Le Tableau 3.1 donne les résultats de cette mise en application et indique dans laquelle des trois zones estimées par le modèle flou (i.e., 1 : zone violette, associée à la fonction d'appartenance *unsafe*; 2 : zones orange et jaune, associées aux fonctions d'appartenance (*intermediate* et *unsafe*))

	Observations		Estimations		
	<i>D</i>	<i>d+d'</i>	Violet	Orange	Jaune
			<i>d+d'</i> <sub>v</sub>	<i>d+d'</i> <sub>o</sub>	<i>d+d'</i> <sub>j</sub>
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

Cellule rouge : Distance (en m) non sûre, donc exposée (i.e., inférieure à la distance observée)  
 Cellule verte : Distance (en m) sûre (i.e., supérieure à la distance observée)

Tableau 3.1 – Mise en application du modèle établi sur 10 nouvelles enveloppes d'avalanches

ou *intermediate* 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 donnée par la droite violette est sous-estimée et ne correspond pas à une distance minimale de sécurité (i.e., 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.
- 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 à *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 sûre. 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 sûre (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 3.11b, 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 exposée (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 sûre (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 grande marge de sécurité) et qui peut conduire à trop restreindre les possibilités de pratique ; une marge trop importante peut aussi être impossible à mettre en œuvre sur le terrain selon sa configuration (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 le système 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 les valeurs associées au sous-critère C2.4 *Peut atteindre le skieur*.

Ainsi, la mise en application de ce modèle sur 10 avalanches 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.

## 3.2 Avalanches récentes et localisation du danger, partie 1 : Le point sur la situation et les méthodes exploitées

Nous présentons au cours de cette section et de la suivante (Section 3.3) les travaux qui participent à l'estimation du paramètre C3.x<sub>1</sub> *Localisation* intervenant dans l'évaluation du critère C3 *Observations d'avalanches récentes* (voir Figure 3.12). Pour les autres paramètres et sous-critères liés aux observations d'avalanches récentes (voir Chapitre 2, Section 2.3.2), soit ils feront l'objet de travaux futurs non développés dans ce manuscrit, soit aucun développement important n'a été nécessaire puisqu'ils sont basés sur la connaissance experte.

### 3.2.1 Avalanches récentes et variabilité

Le critère C3 *Observations d'avalanches récentes* est un critère particulièrement important, le déclenchement d'une avalanche étant un signe évident de danger. Dans l'évaluation du risque d'avalanche, en effet, les observations d'avalanches sont un indicateur particulièrement clair du danger d'avalanche, et une preuve directe de l'instabilité du manteau neigeux [Landrø2020b], donc de la présence d'une couche fragile active (propagation de rupture).

De plus, nous avons vu au Chapitre 1 que les méthodes d'aide à la décision basées sur des indices évidents, et en particulier les méthodes intégrant les observations d'avalanches récentes, sont plus résilientes. Le critère C3 *Observations d'avalanches récentes* est donc un critère qu'il est important de prendre en compte. Il s'agit en effet d'un indicateur indéniable de la présence d'une couche fragile avec propagation efficace dans le manteau neigeux.

Les observations d'avalanches récentes sont une donnée d'entrée prise en considération dans plusieurs méthodes d'aide à la décision existantes [Landrø2020b]. SoG, NT, OCM, Av, CRISTAL et TGoNTG considèrent en effet un tel critère (voir Tableau A.2 en Section 1.2.2 du Chapitre 1). En revanche et jusqu'à présent, ce facteur reste seulement considéré comme un signe d'avertissement et n'est jamais quantifié ni mesuré dans les méthodes existantes [Landrø2020a].

La méthode des indices évidents [McCammon2006a], par exemple, reste vague en ne considérant que "Les avalanches dans le secteur au cours des dernières 48h", sans formaliser les limites du

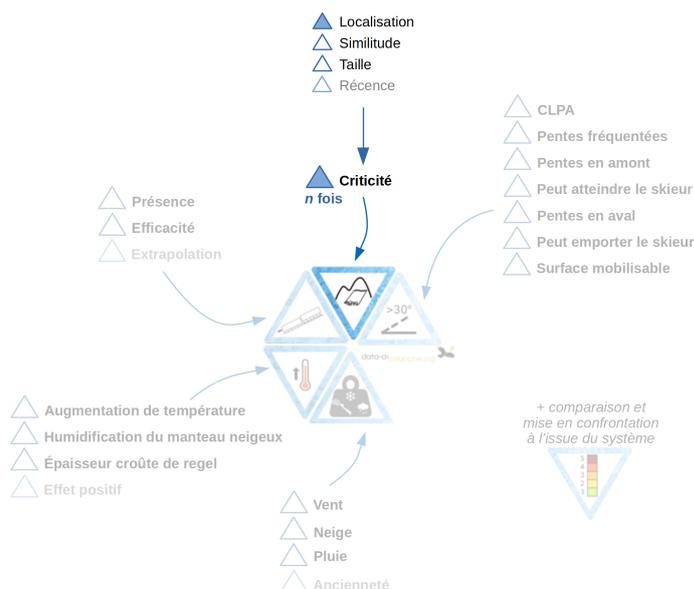


Figure 3.12 – Identification des critères, sous-critères et paramètres faisant l'objet de cette section

secteur considéré. Pourtant, ce critère devrait évaluer les secteurs où des conditions similaires à celles qui ont conduit à l'avalanche observée sont susceptibles d'être rencontrées.

Pour évaluer quelles étendues sont similaires à celles qui ont pu conduire à la réalisation d'une avalanche, il s'agit d'étudier la variabilité du manteau neigeux et donc, initialement, des conditions rencontrées. La plupart des chercheurs s'intéressent à la variabilité interne du manteau neigeux à différentes échelles [Schweizer2008], mais les experts considèrent la surcharge du manteau neigeux comme l'un des principaux facteurs responsables des avalanches spontanées. Pour cette raison, nous nous concentrons dans ce chapitre sur la variabilité géographique de la surcharge du manteau neigeux induite par de récentes précipitations.

Plusieurs travaux [Lemus-Canovas2019] [Casado2010] [Irannezhad2017] ont déjà traité de l'étude des précipitations dans différents pays et régions, mais il n'existe pas de méthode générale qui puisse être appliquée partout. Dans [Lemus-Canovas2019], les auteurs utilisent des méthodes paramétriques (GLM pour *General Linear Models*, GAM pour *General Additive Models*, RK pour *Regression Kriging*), méthodes qui nécessitent donc d'ajuster les paramètres en fonction des observations. Pour les utiliser, il faudrait calculer les paramètres à partir des données afin de rendre ces méthodes indépendantes du jeu de données et qu'elles puissent se généraliser à différents massifs montagneux. Dans [Casado2010], les auteurs cherchent à savoir quelle méthode de classification est la plus performante en étudiant des métriques liées aux taux de bonne classification. Cela nécessite cependant une vérité terrain exhaustive que nous n'avons pas. Enfin, dans l'article [Irannezhad2017], il n'y a pas véritablement de méthode de classification utilisée. Les auteurs étudient en effet, sur un siècle, le rapport  $S/P$  ( $S$  : chute de neige,  $P$  : ensemble des précipitations) calculé par année sur la Finlande. Ils essaient alors d'en extraire des tendances sur la variation du climat. Ils remarquent qu'en fonction des régions (Nord, Centre, Sud), de la température et du nombre de jours de précipitations, les stations de mesures choisies reçoivent des précipitations différentes. Ils tentent alors d'expliquer ces résultats en faisant des corrélations.

### 3.2.2 Apprentissage automatique

Nos travaux relatifs aux avalanches récentes et à la localisation du danger nécessitent le développement d'une méthode générique, capable d'extraire et déduire des informations à partir de

jeux de données et ce sans fixer de contraintes spécifiques ou renseigner de paramètres préalables. Pour ce faire, nous avons utilisé des méthodes d'apprentissage automatique.

Les approches d'apprentissage automatique (ML, pour *Machine Learning*) peuvent être classées selon trois catégories : apprentissage supervisé, apprentissage non supervisé et apprentissage par renforcement.

Dans le cas de l'apprentissage supervisé, les modèles sont entraînés sur des données pour lesquelles une étiquette est fournie pour chacune des observations de la base de données. L'objectif est alors d'utiliser plusieurs caractéristiques en entrée pour prédire un ou plusieurs résultats en sortie. Ces méthodes nécessitent d'importants volumes de données labellisées, ce qui est un obstacle pour certaines applications, comme la nôtre, portant sur la prévention du risque d'avalanche. Si ces méthodes peuvent s'avérer performantes, nous les avons écartées du fait de l'absence de données étiquetées.

Le but de l'apprentissage non-supervisé est de trouver des associations et des motifs dans les données d'entrées. À l'inverse des méthodes supervisées, ces approches ne nécessitent pas de données étiquetées, ce qui génère un véritable gain de temps de préparation en amont. Les méthodes de clustering, la recherche de règles d'association, et la réduction dimensionnelle sont parmi les usages les plus fréquents de l'apprentissage non supervisé. Grâce à l'utilisation de ces approches, des motifs initialement inconnus peuvent être trouvés dans les données fournies en entrée.

L'apprentissage par renforcement est une autre catégorie du ML. Il porte sur le développement d'agents logiciels capables d'optimiser une récompense ; ils apprennent donc les actions à réaliser, dans un environnement, à partir d'expériences, et ceci de manière autonome. Plongé dans un environnement donné, l'agent apprend en recevant des récompenses ou des pénalités en fonction de ses actions. Au travers de son expérience, l'agent cherche à trouver la stratégie décisionnelle optimale qui puisse lui permettre de maximiser les récompenses accumulées au cours du temps, et donc de converger vers un résultat final. Dans les systèmes d'apprentissage par renforcement, un agent logiciel opérant dans un environnement reçoit donc des retours sur ses précédentes actions qui lui permettent de converger vers un résultat final. Par contre, cela nécessite un grand nombre d'itérations. À l'inverse des systèmes d'apprentissage supervisés, les systèmes d'apprentissage par renforcement ne sont pas entraînés sur des échantillons de jeux de données, mais apprennent par essais et erreurs. Tandis que cela élimine le besoin de recourir à des données étiquetées, cela limite souvent l'utilité de ces méthodes à des applications pour lesquelles des expériences de type essai-erreur peuvent effectivement être simulées.

Puisque nous ne disposons pas de données labellisées, nous nous concentrerons, dans nos travaux, sur les méthodes non supervisées. De plus, nous souhaitons développer une approche générique, transférable à d'autres territoires, sans recourir au préalable à l'apport d'une connaissance experte, ce qui nécessite de travailler de façon non supervisée.

Nous verrons dans les sections ci-dessous que le traitement des données que nous exploitons nécessite l'utilisation de méthodes de réduction de la dimensionnalité ainsi que de classification. De nombreuses méthodes non-supervisées peuvent répondre à ces deux besoins :

- LLE (pour *Locally Linear Embedding*), t-SNE (pour *t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding*), Isomap Embedding, MDS pour *Multidimensional Scaling*), l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et UMAP (pour *Uniform Manifold Approximation and Projection*), en ce qui concerne la réduction de dimensionnalité [Anowar2021] ;
- K-means, GMM (pour *Gaussian Mixture Models*), Classification Ascendante Hiérarchique (CAH), DBSCAN (pour *Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*), Propagation d'Affinité (PA), C-moyennes, FCM (pour *Fuzzy C-Means*), ISODATA (pour *Iterative Self Organizing Data Analysis Technic*), en ce qui concerne la classification [Ezugwu2022].

Néanmoins, dans nos travaux, nous n'utilisons qu'une sous-partie d'entre elles (l'explication quant au choix de ces méthodes est détaillée en Section 3.3.1). Nous mettons en effet en oeuvre une succession de méthodes classiques d'analyse statistique et d'apprentissage automatique non-supervisé :

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) [Richman2010], la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) [Praene2019] et l'algorithme K-means [Huang2017] [Zahraie2011] successivement, ainsi que la Propagation d'Affinité (PA) [Frey2007]. C'est pourquoi seules celles-ci sont présentées ci-dessous.

### Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'ACP permet de transformer les variables initiales d'un jeu de données en un nombre réduit de composantes principales. Chacune des composantes principales obtenue correspond alors à une combinaison linéaire des variables initiales.

Pour mieux expliciter ces propos, nous pouvons dire que l'ACP s'applique à un jeu de données qui peut être représenté par un tableau de dimension  $n \times p$ , où  $n$  est le nombre d'individus (ie. les sujets étudiés) et  $p$  le nombre de variables (ie. les observations ou mesures réalisées sur les individus). Ce tableau de données correspond à un nuage de  $n$  points ayant tous une coordonnée sur chacune des  $p$  dimensions, définies par les variables. Un tel espace à  $p$  dimensions étant quasiment impossible à appréhender en l'état, l'ACP permet de réduire le nombre de composantes pour obtenir un espace de dimension inférieure, où il devient plus aisé d'extraire l'essentiel de l'information. L'ACP permet ainsi de passer des  $p$  variables, plus ou moins corrélées, à un nouveau système de variables, toutes strictement indépendantes, dont seules les premières sont véritablement informatives. Les premières composantes contiennent en effet la plus grande part de la variabilité initiale du jeu de données. En particulier, la première composante est celle qui explique le plus d'inertie du nuage de points initial, la seconde est celle qui explique la plus grand part de l'inertie restante et ainsi de suite.

L'ACP fournit alors un résumé de l'information initiale du jeu de données. Elle permet ainsi de réduire la dimension des données, jusqu'à pouvoir même les visualiser graphiquement si la dimension conservée est inférieure ou égale à trois.

### Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

Le rôle de la CAH est de construire des classes par agrégation d'éléments deux à deux. Au cours des itérations successives, la CAH construit donc de  $n - 1$  classes à une seule classe contenant l'ensemble des  $n$  individus. La CAH regroupe les individus de sorte qu'au sein d'un groupe les individus se ressemblent le plus possible (ie. qu'il s'agit de minimiser l'inertie intra-classe) et que les groupes d'individus, à l'inverse, soient le plus différents possibles les uns des autres (ie. qu'il s'agit de maximiser l'inertie inter-classe). Nous utilisons, dans nos travaux, la distance euclidienne et le critère de Ward [Ward1963], qui permet de minimiser la perte d'inertie inter-classe lors de l'agrégation de deux classes.

En effet, soit  $G = \{e_i : i = \{1 : n\}\}$  un groupe de  $n$  individus, de centre de gravité  $g$ , partitionné en  $k$  classes d'effectifs  $n_1, n_2, \dots, n_k$  appelées  $G_1, G_2, \dots, G_k$  et ayant pour centre de gravité  $g_1, g_2, \dots, g_k$  alors, sachant que  $d$  est une distance :

- l'inertie totale du nuage vaut  $I_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d(e_i, g)^2$
- l'inertie inter-classe vaut  $I_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_i \times d(g_i, g)^2$
- l'inertie intra-classe vaut  $I_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} d(e_j, g_i)^2$ .

Sachant que  $I_t$  est constante (liée aux données analysées) et que, d'après le théorème de Huygens,  $I_t = I_e + I_a$ , alors au fur et à mesure des regroupements de classes  $I_a$  augmente et  $I_e$  diminue. Remplacer deux classes par leur union engendre donc une diminution de l'inertie inter-classe ( $I_e$ ).

Dans le cas du regroupement des classes  $G_1$  et  $G_2$ , la diminution s'écrit :

$$\frac{n_1 \times n_2}{n \times (n_1 + n_2)} \times d(g_1, g_2)^2.$$

De manière générale, la méthode de Ward consiste donc à choisir à chaque étape le regroupement qui permet la diminution minimale de l'inertie inter-classe.

Ainsi, contrairement à la plupart des méthodes de classification, qui nécessitent de fixer dès le départ le nombre de classes voulues en sortie, la CAH calcule successivement toutes les combinaisons possibles. Elle les représente ensuite via un dendrogramme, ce qui permettra de choisir le nombre de classes le plus adapté. Généralement, la partition la plus adaptée est celle identifiée par la plus longue branche de l'arbre, la hauteur des branches indiquant le niveau de proximité entre les classes. Ceci revient à couper l'arbre avant une forte perte d'inertie inter-classe. Cette partition permet d'avoir des groupes les plus homogènes possible.

### **K-means**

Le rôle de K-means est de regrouper les  $n$  individus en  $k$  classes. La distance entre les individus au sein de chaque partition doit être minimisée. Au cours des itérations successives mises en œuvre par l'algorithme, un individu est susceptible de se déplacer d'une classe à une autre (ce qui n'est pas le cas dans la CAH, pour laquelle un individu classé reste associé à sa classe jusqu'à la fin).

Dans K-means,  $k$  est un paramètre d'entrée de l'algorithme et doit donc être choisi au préalable. L'algorithme doit aussi être initialisé et les classes obtenues en sortie dépendent de cette initialisation. Il est donc possible, dans le cas d'une initialisation aléatoire, d'obtenir, sur un même jeu de données, des résultats qui diffèrent au cours de plusieurs exécutions de l'algorithme K-means. Notons cependant que, parmi ces différents résultats possibles, l'un d'entre eux maximisera davantage la variance entre les groupes (et donc minimisera davantage la similarité entre les groupes).

### **Propagation d'Affinité (PA)**

L'algorithme de Propagation d'Affinité (PA) est un algorithme qui permet de faire émerger des classes dans un jeu de données. Contrairement à K-means, cet algorithme ne nécessite pas de choisir au préalable le nombre de classes attendu, ni de fournir une initialisation. L'algorithme de propagation d'affinité considère chaque individu du jeu de données comme un potentiel exemplaire et utilise une matrice de similarité entre tous les individus deux à deux. Il permet alors de faire émerger les exemplaires (i.e., des individus de l'ensemble de départ, qui sont représentatifs de leur classe) et les classes associées. L'ensemble des classes contient l'ensemble des individus du jeu de données.

Dans cette méthode, le paramètre de *préférence* influe sur le nombre d'exemplaires extraits. Il est possible, cependant, de laisser la valeur de *préférence* par défaut de la méthode.

Dans l'utilisation de la CAH, pour trouver le nombre de classes, l'arbre est coupé à un certain niveau. Le fait de couper l'arbre à un niveau précis plus qu'un autre modifie le nombre de classes obtenues, mais rien ne garantit pour autant que le niveau choisi ou la règle utilisée pour découper l'arbre (par exemple, coupe au niveau de la branche ayant la plus grande hauteur) ne soient les bons et ce pour chacun des jeux de données.

L'utilisation de la méthode PA, non-supervisée et non-paramétrique, ne nécessite aucune information a priori. Dans cette méthode, deux procédures de transmission de messages, appelées responsabilité et disponibilité, sont en effet utilisées pour échanger des messages entre individus. Ces messages bien élaborés permettent d'identifier de manière itérative le meilleur exemplaire (ou représentant) de chaque classe autour duquel les objets vont être agrégés. La responsabilité  $r(x_i, x_k)$  est envoyée de l'individu  $x_i$  à l'exemplaire candidat  $x_k$  et reflète à quel point il serait approprié que le candidat  $x_k$  soit l'exemplaire de l'individu  $x_i$ . La disponibilité  $a(x_i, x_k)$  est envoyée de l'exemplaire candidat  $x_k$  à l'individu  $x_i$  et reflète à quel point il serait approprié pour l'individu  $x_i$  de choisir le candidat  $x_k$  comme exemplaire. Pour calculer ces deux critères, une matrice de similarité est utilisée comme l'opposée de la distance euclidienne au carré.

La section suivante présente les différents développements qui offrent une première approche de quantification de la zone d'influence d'une avalanche récente observée.

### 3.3 Avalanches récentes et localisation du danger, partie 2 : Estimation de la criticité d'une avalanche du fait de la localisation

Pour aborder cette section, il est d'abord nécessaire de préciser les notions d'avalanches *spontanées* et *accidentelles*. Les avalanches spontanées sont des avalanches dont le déclenchement s'est produit naturellement, le plus souvent peu de temps après un temps perturbé. Le terme *avalanche naturelle* est d'ailleurs souvent employé pour les désigner. Les avalanches accidentelles correspondent quant-à elles aux avalanches déclenchées du fait d'un skieur. Elles surviennent tout au long de l'hiver et peuvent être provoquées sans faire suite à un temps perturbé.

Sur le terrain, pour prendre les décisions les plus sûres, il est nécessaire d'estimer les étendues où des conditions similaires à celles qui ont conduit aux avalanches récentes observées sont susceptibles d'être rencontrées. Nous proposons alors une première approche pour quantifier la criticité d'une avalanche du fait de sa localisation, par rapport à celle du skieur. Bien que plusieurs paramètres peuvent être pris en compte pour évaluer la notion de *conditions similaires*, nous nous concentrons ici sur la quantité de neige fraîche accumulée au cours des dernières 24 heures. Nos travaux portent en effet en particulier sur les avalanches spontanées, c'est pourquoi nous nous appuyons sur l'analyse des précipitations récentes. Dans ce contexte, notre principal objectif est alors d'identifier les secteurs des Alpes françaises qui sont susceptibles de recevoir les mêmes cumuls de neige fraîche, selon différentes tendances météorologiques. Ceci équivaut à l'étude de la variabilité des conditions de précipitations pluviométriques à plus basses altitudes, où la densité des stations de mesure automatiques est plus importante, sachant également qu'il est difficile d'obtenir des cumuls de neige précis en altitude du fait de l'action du vent.

Tandis que deux localisations peuvent rencontrer les mêmes conditions de précipitations sous une tendance donnée, elles peuvent se comporter différemment sous une autre. De plus, certaines étendues sont susceptibles d'être affectées par différentes tendances météorologiques. Ainsi, lors de l'observation d'une nouvelle avalanche spontanée, il est nécessaire d'estimer la tendance météorologique qui y a conduit, afin d'estimer à quel point l'avalanche observée fait sens par rapport à la zone fréquentée par le skieur, i.e., est-ce que les deux localisations sont susceptibles de présenter le même niveau de danger (ayant connu au préalable le même type de conditions) ?

Dans ce cadre, l'objectif spécifique de nos travaux est donc d'abord de classer les journées qui sont similaires en termes de localisation des principaux cumuls de précipitations. Pour ce besoin, nous avons développé une méthode de classification multi-niveaux. Ainsi, nous faisons émerger les principales tendances météorologiques qui affectent une zone de montagne et pouvons déterminer la zone d'influence d'une observation d'avalanche. Ensuite, il s'agit d'extraire, pour chaque tendance, les zones associées à des conditions plus ou moins favorables liées à la surcharge du manteau neigeux. Cela permet, enfin, d'estimer la situation d'un jour donné afin d'utiliser le paramètre  $C3.x_1$  *Localisation* (du critère  $C3$  *Observations d'avalanches récentes*) dans le système global.

#### 3.3.1 Processus de classification multi-niveaux pour la détection de tendances météorologiques

Pour extraire les différentes tendances météorologiques affectant les Alpes françaises, nous avons développé nos travaux sur la base d'un jeu de données contenant 12 années de mesures de précipitations collectées en saison hivernale. Ces mesures ont été enregistrées selon un pas horaire (i.e., une mesure par heure) sur 90 stations automatiques réparties sur les Alpes françaises. Les données proviennent des stations de mesure automatiques EDF-DTG<sup>2</sup>.

---

2. Cette thèse utilise les données météorologiques de l'entreprise EDF-DTG sur les départements de Haute-Savoie, Savoie, Isère, Hautes-Alpes, Alpes de Haute Provence et Alpes Maritimes, pour les périodes hivernales de Novembre 2009 à Mai 2021. Cette utilisation a été validée entre EDF-DTG et l'USMB par la convention H-44200965-2020-000297

Chaque entrée du jeu de données correspond à une journée (soit 1455 entrées au total). Chaque journée est décrite selon 90 variables qui correspondent chacune au cumul de précipitations sur 24 heures enregistré par l'une des stations de mesure.

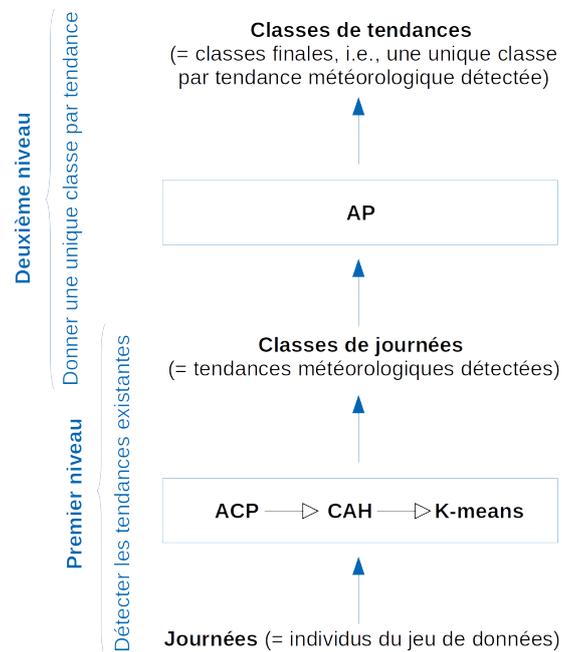


Figure 3.13 – Représentation simplifiée du processus de classification multi-niveaux

L'application de méthodes de classification non-supervisée sur le jeu de données complet (i.e., 1455 jours) conduit à classer les jours selon le total de précipitations reçues plutôt que selon la localisation des principaux cumuls de précipitations. La Figure 3.14a illustre cette affirmation. Elle montre en effet trois classes présentant la même localisation des précipitations mais associées à trois intensités différentes (i.e., à des cumuls plus ou moins importants). Cela ne donne donc pas le type de résultat attendu, puisque nous cherchons à obtenir des classes qui permettent d'identifier la localisation des principaux cumuls.

Des expérimentations ont montré que le fait de travailler sur des jeux de données plus petits (i.e., contenant moins de journées ; par exemple une année au lieu de 12 années) conduit à des classes qui capturent la localisation des précipitations plutôt que le total de précipitations reçues (voir Figure 3.14b). Ainsi, la réduction du jeu de données (i.e., la diminution du nombre d'individus qu'il contient) améliore considérablement les résultats. Pour cette raison, nous avons décidé de fractionner le jeu de données initial en 12 sous-jeux de données, chacun correspondant alors à une saison hivernale.

L'application de méthodes de classification sur 12 jeux de données nécessite ensuite une fusion des résultats obtenus séparément sur chacun des 12 sous-jeux de données en un résultat global. C'est pour cela que nous avons développé un processus de classification multi-niveaux. Ce processus a pour objectif de donner en sortie les principales tendances météorologiques qui affectent le secteur étudié. Il applique pour cela deux niveaux de classification qui visent à :

1. Détecter toutes les tendances météorologiques existantes.

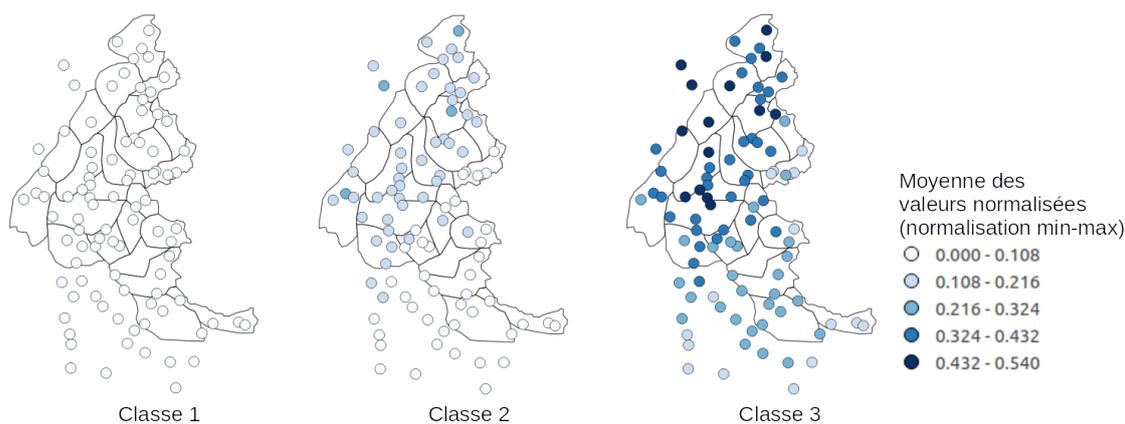
Ce premier niveau de classification s'applique aux journées de chacun des jeux de données traité séparément. Son but est de regrouper les individus (i.e., les journées) qui sont similaires en termes de localisation des principaux cumuls de précipitations (i.e., les jours qui reçoivent les principaux cumuls de précipitations au niveau des mêmes stations de mesure). Chaque classe obtenue (donc chaque groupe de journées) correspond alors à une tendance météorologique, les jours recevant des cumuls de précipitations similaires aux mêmes en-

droits.

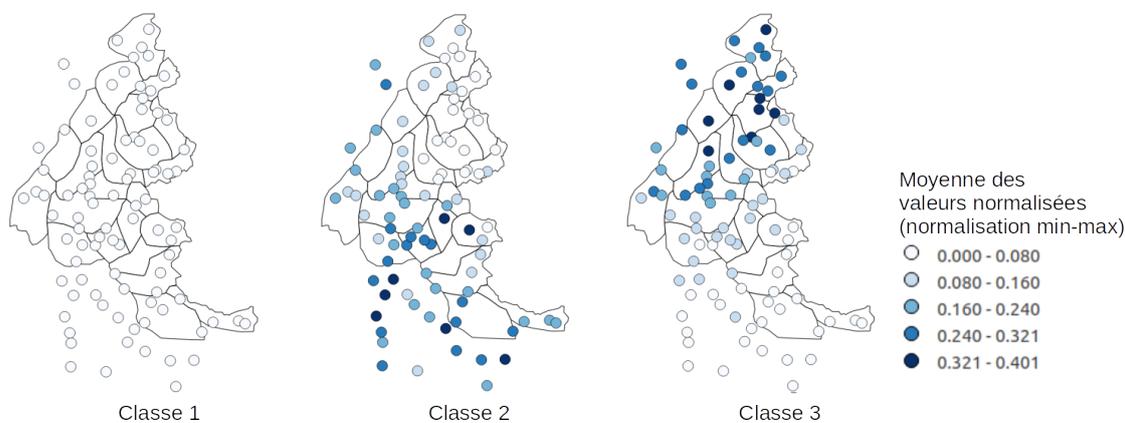
2. Donner une unique classe finale par tendance.

Ce second niveau de classification s'applique aux classes obtenues à l'issue du premier niveau de classification afin de regrouper les tendances détectées plusieurs fois. Cela permet alors d'obtenir une unique classe finale correspondant à chaque tendance identifiée.

La Figure 3.13 donne une représentation simplifiée du processus de classification multi-niveaux. Ainsi et pour résumer, le processus débute sur 12 sous-jeux de données en entrée, applique deux niveaux de classification successifs, et communique en sortie les principales tendances qui affectent le secteur étudié. Cela permet *in fine* l'identification des étendues impactées de la même façon pour une tendance donnée.



(a) Jeu de données complet (i.e., 12 saisons hivernales)



(b) Une année, exemple de la saison hivernale 2012-2013

Figure 3.14 – Classification (ACP → CAH → K-means)

Pour plus de détails sur l'utilisation de la séquence ACP → CAH avant la mise en œuvre de K-means, voir ci-dessous la section dédiée au Premier niveau de classification.

Le jeu de données sur lequel nous avons développé nos travaux est structuré comme suit : les individus étudiés sont les journées, les variables sont les cumuls de précipitations enregistrés pour 24 heures par les différentes stations météorologiques. Ainsi, nous gérons donc à la fois des composantes spatiales et temporelles. La composante temporelle, d'abord, permet de fractionner le jeu de données en 12 sous-jeux de données (afin de travailler sur chaque saison hivernale de façon indépendante). Ensuite, comme mentionné, la composante temporelle nous permet d'identifier les individus étudiés puisque nous réalisons un travail de classification sur les journées. Pour chaque individu, les 90 variables correspondent aux mesures de cumuls de précipitations reçues sur les 90 stations réparties sur les Alpes françaises, ce qui induit une composante spatiale indirecte puisque

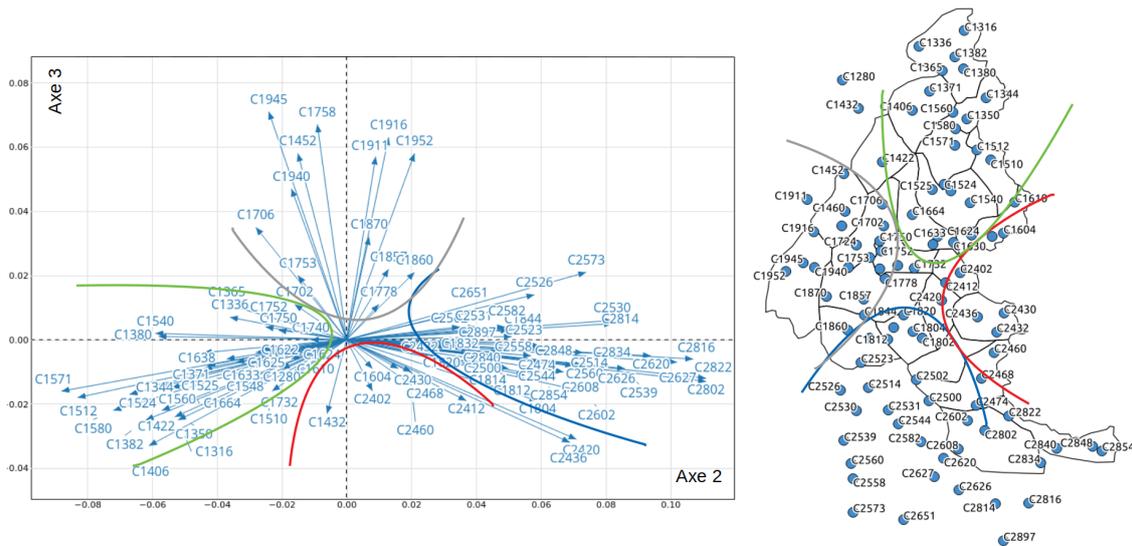


Figure 3.15 – Principales composantes de l'ACP et localisation géographique des stations, exemple de la saison hivernale 2012-2013

chaque station de mesure occupe une position spécifique sur le territoire. La composante spatiale liée à la localisation géographique des stations de mesure n'est par contre jamais directement prise en compte (i.e., que nous ne prenons pas directement en considération des informations spatiales comme la latitude et la longitude). Ces informations émergent cependant du fait de l'ACP dont les principales composantes reflètent la localisation géographique des stations (voir Figure 3.15).

Dans la suite de cette section, nous présentons le processus de classification multi-niveaux dans sa globalité et en détails (voir Figure 3.16). La Figure 3.18, qui illustre l'ensemble du processus lorsqu'il est appliqué à nos données, complète la vue d'ensemble du processus de classification multi-niveaux.

Nous présentons donc d'abord les deux niveaux de classification successivement. Cette présentation donne une description théorique du processus de classification multi-niveaux. Nous donnons ensuite l'application concrète du processus à nos données ainsi que les résultats obtenus. Ceci donne alors une description appliquée du processus. Nous abordons enfin la question de la gestion des données manquantes.

### Premier niveau (ACP → CAH → K-means)

Le premier niveau comporte cinq étapes successives. Ces cinq étapes, notées 1.1 à 1.5, sont visibles sur la Figure 3.16. Elles sont détaillées tour à tour dans la suite de cette section.

D'abord, comme évoqué, le jeu de données initial est fractionné en sous-jeux de données (voir étape 1.1, Figure 3.16), afin de traiter chaque saison hivernale individuellement. Nous obtenons alors  $n$  sous-jeux de données. Chacun de ces sous-jeux de données contient alors  $x$  individus et  $y$  variables ( $x$  peut différer légèrement selon l'année considérée).

Les sous-jeux de données ont une caractéristique qui nécessite alors un prétraitement (voir étape 1.2, Figure 3.16) : les variables ont des ordres de grandeurs différents alors que toutes doivent avoir la même importance pour les traitements suivants. Comme étape de prétraitement, nous normalisons alors l'étendue des variables pour les ramener entre 0 et 1, ce qui leur permet d'avoir toutes le même poids pour les traitements suivants. Toutes les valeurs sont alors divisées par la valeur maximale enregistrée par la station de mesure considérée au cours des 12 saisons (i.e., sur l'ensemble de données disponibles). Cela correspond à une normalisation min-max :

$$(value - min) / (max - min) \quad (3.1)$$

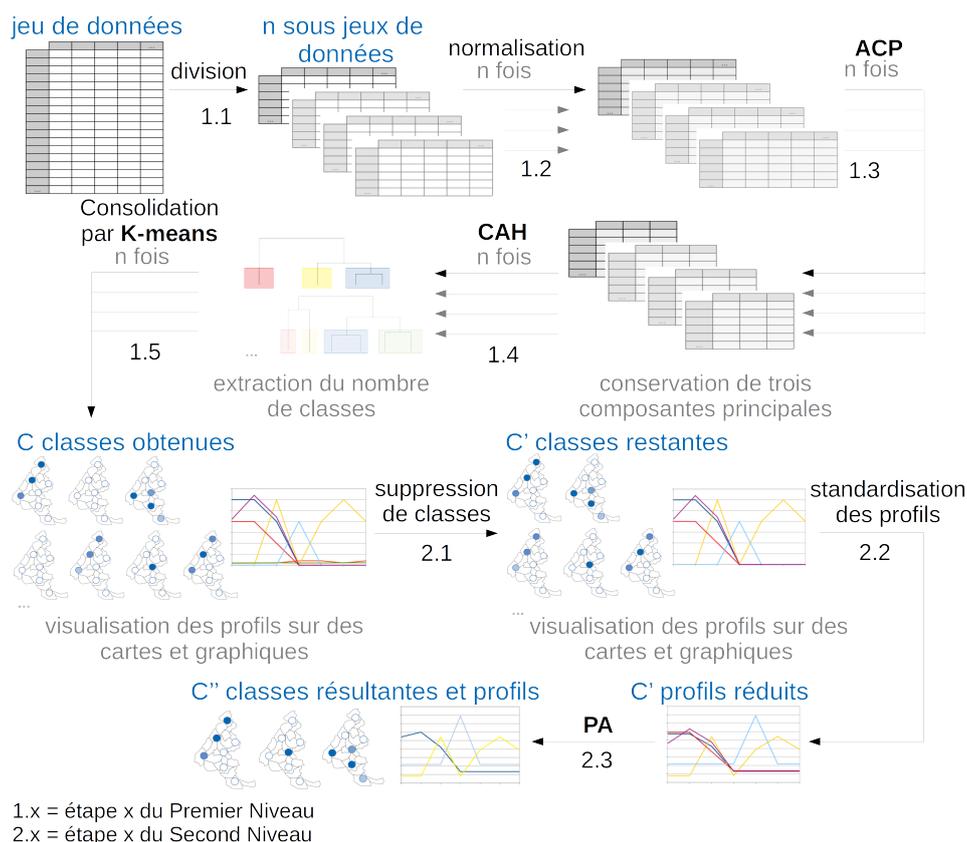


Figure 3.16 – Représentation détaillée du processus de classification multi-niveaux

Dans notre contexte, quelle que soit la variable :  $min = 0$ . Ainsi, l'équation devient :

$$value / max \quad (3.2)$$

Chaque variable traduit alors l'idée que les précipitations enregistrées au cours des dernières 24 heures sont faibles ou importantes par rapport au cumul maximum de précipitations que la station a connu durant les 12 années. Ce prétraitement permet de travailler sur l'importance des précipitations reçues relativement aux caractéristiques de chacune des stations de mesure.

À l'issue des prétraitements, la principale partie du premier niveau de classification consiste en trois méthodes mise en œuvre successivement pour obtenir le résultat de classification [Murtagh2014] [Tufféry2012]. Cette séquence correspond aux étapes 1.3, 1.4 et 1.5 de la Figure 3.16.

Les sous-jeux de données que nous étudions comportent 90 variables, ce qui nécessite une étape de réduction de la dimensionnalité. Dans notre contexte, en effet, travailler sur un nombre réduit de composantes principales permet de réduire la dimension du problème, simplifier l'interprétation des résultats à l'issue de la classification et supprimer une part du bruit contenu dans les sous-jeux de données du fait de la nature du phénomène étudié. C'est pourquoi nous mettons d'abord en œuvre, dans notre processus, l'ACP, méthode classique de réduction de la dimensionnalité. Son objectif est donc de transformer les  $y$  variables en un nombre réduit de composantes principales. À l'issue de l'ACP, nous ne retenons que trois composantes principales puisqu'elles capturent la plus grande part de la variabilité initiale du jeu de données et sont aisément explicables. La première composante correspond à une opposition entre les journées sèches et les journées humides, tandis que les composantes deux et trois correspondent aux oppositions Nord / Sud et Est / Ouest. De plus amples détails concernant ces trois composantes principales sont données dans [Pagnier2021].

À l'issue de l'ACP et pour établir la classification, nous souhaitons exploiter la méthode K-means afin de regrouper sans a priori les individus en groupes homogènes. Cependant, nous ne

connaissions pas, sans connaissance a priori, le nombre de classes attendues en sortie de l'algorithme K-means. Puisque nous souhaitons développer un processus générique et non basé sur une connaissance experte préalable, nous souhaitons le déduire directement des données. Pour ce faire, nous décidons d'avoir recours à l'exploitation successive des deux méthodes de classification CAH et K-means afin de tirer les avantages de chacune d'elles. La CAH nous permet de suggérer un premier nombre de classes que nous exploitons ensuite dans K-means.

Grâce à la fonction HCPC du package FactoMineR de R, le nombre de classes le plus approprié pour notre sous-jeu de données est obtenu automatiquement. La partition est alors celle avec la plus grande perte d'inertie relative (voir *HCPC fonction - RDocumentation* <https://www.rdocumentation.org/packages/FactoMineR/versions/2.4/topics/HCPC>). Nous appelons ce nombre de classes  $c_i$  (où  $i$  représente chaque sous-jeu de données, i.e.,  $i \in [1, n]$ ). Notons que ce nombre obtenu automatiquement est convenable. Nous verrons en effet dans la section dédiée à l'application du processus à nos données que le nombre de classes obtenu à l'issue de la CAH est de l'ordre de cinq (il varie entre trois et sept selon les sous-jeux de données). Cet ordre de grandeur est donc raisonnable et cohérent avec les différents flux météorologiques susceptibles d'affecter les Alpes françaises, sachant que certains sont parfois obtenus dans des intensités différentes.

La CAH a cependant un inconvénient : lorsqu'un individu est mal classé au cours d'une itération, il le reste jusqu'à la fin. L'utilisation de l'algorithme K-means permet alors d'améliorer cette classification. Il permet en effet à chaque individu de se déplacer d'une classe à une autre au cours de l'ensemble des itérations successives. Lors de la réalisation de K-means à l'issue de la CAH, on parle de consolidation par K-means. L'algorithme K-means devant être initialisé, nous l'initialisons alors sur la base du résultat donné par la CAH (les  $k$  centroïdes de départ fournis à K-means sont alors les centres de gravité des  $c_i$  classes obtenues à l'issue de la CAH). Ceci permet de s'affranchir d'une initialisation aléatoire de K-means.

Ainsi et pour résumer, puisque l'un de nos objectifs est de développer un processus générique, adapté à d'autres données (par exemple pour les Alpes suisses) sans avoir recours au préalable à une connaissance experte, nous cherchons à établir une méthode qui suggère une première estimation de la valeur de  $k$ . K-means n'est donc pas exécuté aléatoirement mais vient en consolidation du résultat de la CAH. D'autres utilisent aussi cet enchaînement CAH  $\rightarrow$  K-means pour ne pas présupposer le nombre de classes voulu pour leur partition [Dkengne Sielenou2021].

Nous appliquons cette séquence (ACP  $\rightarrow$  CAH  $\rightarrow$  K-means) à chaque sous jeu de données. À la fin du premier niveau de classification, nous obtenons un total de  $C$  classes, où  $C = \sum_{i=1}^n c_i$ . Le nombre de classes ( $c_i$ ), estimé automatiquement par le processus, est susceptible de différer d'un sous jeu de données à un autre. Par conséquent, nous avons ici quelques inconvénients :

- Le processus ne détecte pas toujours toutes les tendances, même si elles sont effectivement présentes dans le sous jeu de données. Les tendances minoritaires spatialement (i.e., faible secteur impacté par les précipitations) ou temporellement (i.e., très faible nombre de journées associée à cette tendance sur l'ensemble de la saison) sont en effet sous détectées.
- Le processus retourne parfois plusieurs classes qui correspondent à la même tendance météorologique (i.e., même localisation des précipitations), mais avec différentes intensités. Si la réduction de la dimension des jeux de données pris en entrée permet de détecter des classes qui capturent la localisation des principaux cumuls de précipitations, des classes correspondant aux mêmes secteurs impactés mais associés à différents cumuls de précipitations continuent d'émerger.

Ces inconvénients expliquent pourquoi nous utilisons un processus de classification multi-niveaux :

- la répétition du premier niveau de classification sur plusieurs sous jeux de données (donc sur plusieurs saisons hivernales) augmente les possibilités de détection de toutes les tendances ;
- un second niveau de classification est alors requis pour regrouper les classes similaires (i.e., les classes qui correspondent à la même zone impactée par les précipitations, mais avec dif-

férentes intensités), qu'elles aient été obtenues sur un sous jeu de données ou sur différentes saisons hivernales.

Bien sûr, à l'issue de l'ensemble du processus, l'objectif est de détecter toutes les tendances principales et d'obtenir seulement une classe finale par tendance, i.e., classer ensemble toutes les classes dont les principaux cumuls sont localisés aux mêmes endroits, mais disposant d'intensités différentes. Pour expliquer cela, nous introduisons la notion de *profil de précipitations*.

Le profil de précipitations d'une journée est la représentation graphique des précipitations reçues sur chacune des stations de mesure (i.e., sur les y variables). Ce profil peut être représenté sur un graphique ou une carte (grâce à la localisation des stations). Il permet alors l'identification de la localisation des étendues les plus affectées par les précipitations. Un profil peut représenter des données brutes ou des données normalisées (données à l'issue de l'équation 3.2). La Figure 3.17 montre, pour le 08 janvier 2018, le profil normalisé sur un graphique (Figure 3.17a, valeurs entre 0 et 1) et le profil brut sur une carte (Figure 3.17b, valeurs correspondant aux précipitations en mm). Les stations les plus affectées (et par extension les étendues les plus affectées) correspondent aux pics sur le graphique et aux points les plus foncés sur la carte. Le profil d'une classe (donc d'un groupe de journées) correspond à la moyenne des profils des journées constituant cette classe. Les profils ayant des formes similaires (sur le graphique) correspondent à la même tendance puisque les mêmes stations (donc les mêmes étendues) sont principalement affectées dans les deux cas. Pour une tendance donnée, les profils peuvent varier en valeurs (ce qui correspond à des précipitations plus ou moins intenses). Puisque le besoin est de regrouper l'ensemble des classes ayant des précipitations localisées aux mêmes endroits, même si elles sont d'intensités différentes, alors le processus cherche à regrouper les profils ayant des formes similaires, y compris s'ils sont différents en intensité. Une tendance météorologique donnée impacte en effet les mêmes secteurs, quel que soit le cumul final de la perturbation.

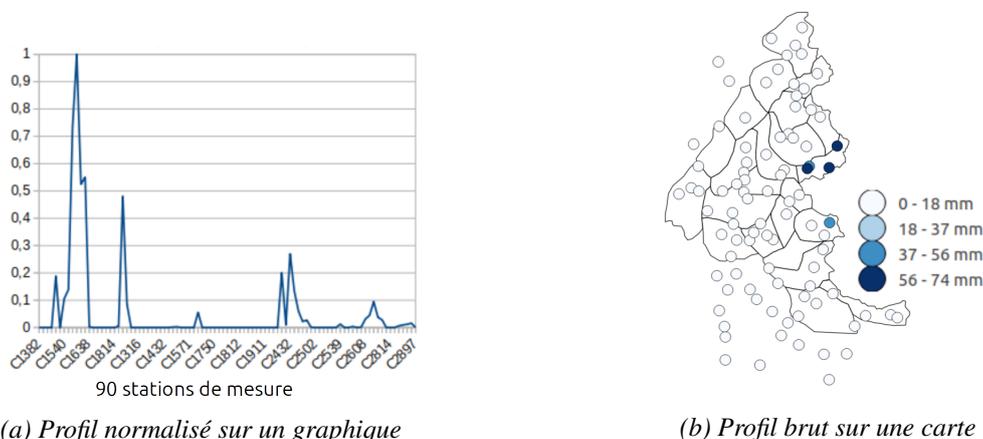


Figure 3.17 – Illustration de la notion de profil de précipitations (08 janvier 2018)

Dans ce contexte, pour le second niveau de classification décrit ci-dessous, nous considérons désormais comme individus les profils des classes (obtenues au premier niveau). Puisque le premier niveau génère  $C$  classes,  $C$  profils différents sont alors considérés. Pour le second niveau, ce ne sont pas les centroïdes des classes qui sont pris comme individus. Ceci se justifie par le fait que leurs valeurs sur les trois composantes données par l'ACP sont chacune dans un référentiel spécifique. Cela vient du fait que ce référentiel est issu du calcul de l'ACP sur chacun des sous jeux de données pris indépendamment des autres. Le fait de revenir aux variables initiales (y variables) permet d'avoir un référentiel commun pour toutes les classes.

Le second niveau est présenté dans la section suivante. Il est composé de trois étapes (notées 2.1 à 2.3) visibles sur la Figure 3.16. Chacune de ces étapes est détaillée ci-dessous.

## Second niveau (PA)

À ce stade, les classes composées de journées associées à aucune ou à de faibles précipitations peuvent être supprimées. En effet, puisque nous travaillons dans le contexte du risque d'avalanche, ces classes sont sans intérêt puisqu'elles ne correspondent pas à une surcharge suffisamment importante pour impacter la stabilité du manteau neigeux et générer une activité avalancheuse. Nous décidons alors de supprimer toutes les classes pour lesquelles le profil est, sur l'ensemble des variables, inférieur à 0,2 (voir étape 2.1, Figure 3.16). Notons que nous avons testé d'exploiter le processus en supprimant directement du jeu de données les journées ayant aucune ou de faibles précipitations (i.e., journées ayant des valeurs plus faibles que 0,2 sur chacune des variables). La suppression de ces journées avant de démarrer le processus de classification multi-niveaux (i.e., avant l'étape de l'ACP) plutôt que la suppression des classes de profil inférieur à 0,2 à l'issue du premier niveau, conduit tout de même le premier niveau de classification à retourner de telles classes. Ceci s'explique par le fait que les valeurs supérieures à 0,2 qui engendrent la conservation des journées sont éparpillées et ne sont pas situées, pour l'ensemble des journées conservées, sur les mêmes stations de mesure. De ce fait, une fois regroupées en classes, les profils moyens obtenus peuvent être constamment inférieurs à 0,2 même si les journées, individuellement, contiennent une ou plusieurs stations dont les valeurs dépassent ce seuil. Ainsi, la seule suppression des classes, à l'étape 2.1, permet une unique suppression (tandis qu'une suppression directe des journées avant le démarrage du processus, requiert tout de même la suppression des classes associées à de faibles précipitations à l'étape 2.1). De plus, cela permet de conserver un maximum d'informations disponibles sur les données initiales pour l'étape de l'ACP, ce qui permet de mieux mettre en évidence la composante spatiale décrite précédemment. Puisque les variables ont été normalisées (voir étape 1.2 ci-avant), 0,2 signifie que les précipitations sont inférieures à 20% du cumul maximum de précipitations observées en 24 heures sur la station au cours de 12 saisons. Ce seuil est arbitraire, mais nous avons conduit des expérimentations avec des seuils de 0,1 et 0,3 et ces variations de seuil n'ont pas d'impact sur le résultat final. À ce stade,  $p$  profils sont alors supprimés. Il reste donc  $C'$  profils considérés comme les individus à étudier au second niveau de classification, où  $C' = C - p$ .

Ensuite, puisque le besoin est de regrouper les profils qui sont similaires dans leur forme mais pouvant présenter des différences d'intensité, nous devons les standardiser (i.e., centrer et réduire) avant de réaliser la nouvelle étape de classification. Ainsi, les profils similaires dans leur forme deviennent alors similaires en valeurs (voir étape 2.2, Figure 3.16). Pour chaque profil, les valeurs sont remplacées par :

$$(values - \mu) / \sigma, \quad (3.3)$$

où  $\mu$  est la moyenne et  $\sigma$  l'écart-type des 90 valeurs constituant le profil.

Les  $C'$  profils standardisés peuvent alors être classés. Pour ce niveau de classification (voir étape 2.3, Figure 3.16), nous décidons d'utiliser la méthode PA [Frey2007] puisqu'elle ne nécessite pas de fixer le nombre de classes souhaité, ni de choisir un ensemble de point initial. Notons que nous n'exploitons pas, à ce stade, la CAH pour déduire le nombre de classes. Automatiquement cette méthode suggère en effet un découpage en trois classes. Cependant, CAH seule ou CAH et K-means ne permettent pas de détecter (parmi ces trois classes) la classe propre aux flux de type "retour d'est", phénomène pourtant bien connu, générant des crues avalancheuses localisées à l'est des Alpes françaises. De plus, même si plusieurs méthodes existent pour estimer directement la valeur de  $k$  préconisée pour les données analysées (méthode du coude, coefficient de silhouette, critère de Davies-Bouldin), il n'était pas aisé ici de trancher en faveur de l'une ou l'autre des valeurs à assigner à  $k$  : coude peu visible sur la méthode du coude, les deux autres méthodes préconisant une valeur de  $k = 2$  et, si l'on cherche à dépasser cette classification évidente, ne permettraient pas de trancher significativement en faveur de quatre ou six classes. De ce fait, nous avons choisi d'exploiter une autre méthode de classification. Nous souhaitons baser cette classification sur la méthode AP, une approche de classification non-supervisée et non-paramétrique qui

présente plusieurs avantages : besoin d'aucune connaissance a priori, partitionnement de données quel que soit le domaine applicatif, adaptabilité au contenu informationnel des données.

Une étude comparative des principaux classifieurs semi-supervisés (connaissance du nombre de classe) et non-supervisés (C-moyennes, FCM pour *Fuzzy C-Means*, ISODATA pour *Iterative Self Organizing Data Analysis Technic* et PA) a montré la supériorité de la méthode de propagation d'affinité (PA) [Chehdi2014]. Les méthodes C-moyennes, FCM et ISODATA sont affectées par le choix initial des centres des classes. Il est donc nécessaire de rejouer la méthode un certain nombre de fois pour voir sa robustesse. De plus, pour FCM, il faut également choisir le paramètre de fuz-zification. Enfin, la méthode ISODATA consiste à éclater ou fusionner les clusters en fonction de seuils pré-établis, ce qui représente un inconvénient pour notre besoin.

Comme présenté dans la littérature pour d'autres domaines [Meng2016], la version non super-visée de PA (qui consiste à utiliser la valeur de préférence par défaut, i.e., la valeur de la médiane de la matrice de similarité) donne habituellement un nombre de classes trop important [Frey2007]. Cela était d'ailleurs notre cas lorsque nous avons testé l'utilisation directe de PA sur les résultats de l'ACP au premier niveau de classification (à la place de l'utilisation de CAH et K-means). C'est pourquoi nous n'avons pas retenu l'utilisation de PA pour le premier niveau. À ce stade, cependant, puisque nous travaillons sur des données prétraitées et des individus moyens obtenus lors du premier niveau de classification, la valeur de préférence (*pref*) par défaut permet d'obtenir en sortie un nombre acceptable de classes. Le ratio entre *pref* et la valeur maximale de la matrice de similarité est approximativement de 40%. Ce ratio vaut approximativement 1% lorsque nous utilisons PA au premier niveau de classification. Cette différence explique l'observation indiquée ci-dessus. Plus la valeur de la préférence est élevée, plus le nombre de classes en sortie est bas. Ainsi, lors du second niveau de classification, la valeur de préférence fixée par défaut est adaptée pour donner en sortie un nombre de classes satisfaisant.

Ainsi, par l'intermédiaire de la méthode PA pour ce second niveau de classification, le processus donne finalement une seule classe par tendance météorologique, tout en retournant correc-tement chacune des tendances détectées durant le premier niveau. Le processus donne ainsi  $C''$  classes finales. Chaque classe résultante correspond à un groupe de profils similaires dans leurs formes (i.e., des profils qui correspondent à des précipitations localisées aux mêmes endroits). Ainsi, à ce stade, nous pouvons visualiser sur des cartes les profils obtenus (qui sont des moyennes des profils standardisés traités lors de ce second niveau). Cela donne ainsi une première idée des étendues principalement affectées par les précipitations sous les différentes tendances détectées à l'échelle des Alpes françaises.

#### Application de la classification multi-niveaux à nos données

Nous donnons dans cette section le résultat de la classification multi-niveaux appliquée à nos données (Figure 3.18). Notre jeu de données contient 12 saisons hivernales (i.e., journées du 1<sup>er</sup> décembre au 31 mars) de la saison 2009-2010 à la saison 2020-2021. Il contient donc, au total, 1455 individus. Une fois fractionné, nous obtenons 12 sous jeux de données (i.e.,  $n = 12$ ), chaque jeu de données correspondant à une saison. Selon l'année considérée, les sous jeux de données contiennent 121 ou 122 individus et 90 variables.

Nous prétraitons d'abord chaque sous jeu de données et appliquons le premier niveau de clas-sification. Puisque nous conservons les trois premières composantes de l'ACP, nous conservons entre 84,5% et 90,5% de la variabilité initiale des sous jeux de données. La CAH suggère de gé-nérer entre trois et sept classes (i.e.,  $c_i \in [3;7]$ ) selon les sous jeux de données. Nous appliquons finalement K-means pour consolider le résultat. Ainsi, sur les 12 sous jeux de données, nous obte-nons 48 classes au total (i.e.,  $C = 48$ ). Nous calculons alors les 48 profils correspondants.

Avant le second niveau de classification, nous prétraitons à nouveau les données en supprimant les profils correspondant à de faibles précipitations (avec un seuil fixé à 0,2). Nous supprimons alors 15 profils (i.e.,  $p = 15$ ). Nous calculons alors les profils standardisés des 33 profils restants

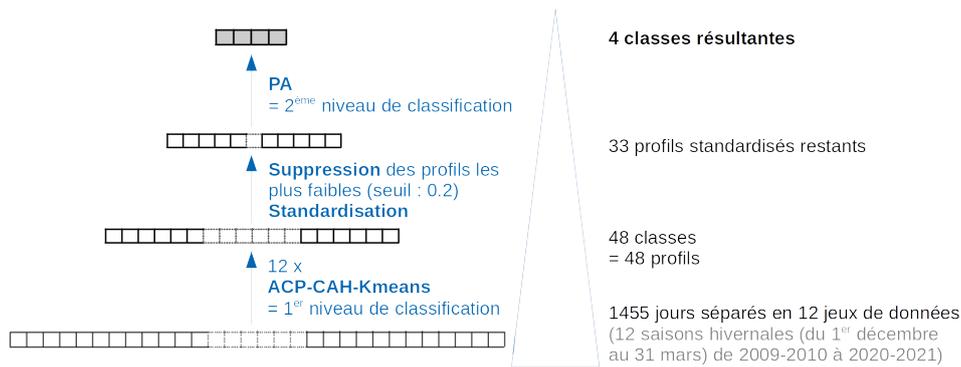


Figure 3.18 – Classification multi-niveaux appliquée à nos données

(i.e.,  $C' = 33$ ). Ensuite, nous appliquons le second niveau de classification, i.e., PA. Le processus produit en sortie quatre classes (i.e.,  $C'' = 4$ ). La Figure 3.19 montre des cartes représentant ces quatre profils. Les quatre classes obtenues correspondent à quatre journées fictives, qui sont typiques de quatre tendances météorologiques principales détectées par le processus (Figure 3.19). Ces tendances sont les suivantes :

- les étendues les plus impactées sont situées au sud des Alpes françaises, ce qui correspond à un flux venant majoritairement des directions sud et sud-ouest ;
- les étendues les plus impactées sont situées au nord des Alpes françaises, ce qui correspond à un flux venant du nord-ouest ;
- les étendues les plus impactées sont situées à l'est des Alpes françaises, ce qui correspond à un flux de type retour d'est ;
- les étendues les plus impactées sont situées à l'ouest des Alpes françaises, ce qui correspond à un flux venant majoritairement de l'ouest, affectant en premier lieu les massifs pré-alpins.

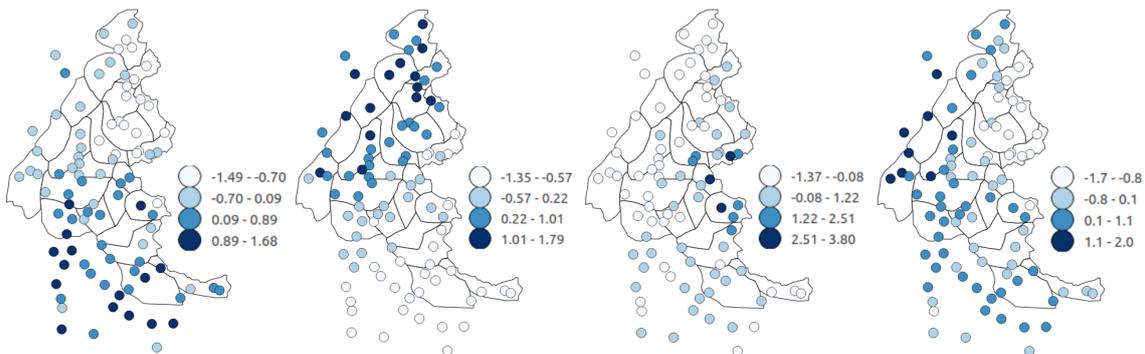


Figure 3.19 – Visualisation des profils réduits moyens des classes obtenues en sortie du processus de classification multi-niveaux et identification des étendues principalement affectées par les précipitations (points blancs : peu ou pas de précipitations ; points foncés : cumuls de précipitations élevés)

Nous savons désormais qu'au minimum quatre tendances météorologiques différentes peuvent être détectées sur le jeu de données composé des 12 saisons hivernales. Nous pouvons alors comparer ces résultats à ceux que l'on obtiendrait en appliquant l'algorithme K-means directement sur les trois composantes principales extraites par l'ACP sur l'ensemble du jeu de données (i.e., les 12 saisons hivernales), en laissant une initialisation aléatoire et en fixant  $k = 4$ .

Dans cette situation, K-means ne détecte que deux tendances différentes (sur la Figure 3.20, les classes 1 et 4 correspondent à deux tendances différentes, ayant la même gamme d'intensité), et

une de ces tendances apparaît avec trois intensités différentes (voir les classes 2, 3 et 4 sur la Figure 3.20). Ainsi, la mise en œuvre de K-means sur l'ensemble du jeu de données ne retourne pas un résultat optimum (puisque seulement deux des quatre tendances possibles sont détectées, et qu'une unique tendance est obtenue plusieurs fois) : même en imposant  $k = 4$ , K-means n'obtient pas les quatre tendances possibles. Ceci met donc en évidence le fait que le processus de classification multi-niveaux (qui travaille sur un jeu de données fractionné dans un premier niveau de classification et fusionne les résultats dans un second niveau) produit de meilleurs résultats. Ainsi, nous avons donc développé un processus de classification qui 1) retourne, après plusieurs étapes, les tendances météorologiques principales affectant un territoire donné, 2) met en œuvre un processus automatique qui ne nécessite pas de spécifier des paramètres d'entrée, ni d'affiner certains paramètres au cours du temps, 3) ne nécessite aucune assistance experte et 4) est suffisamment générique pour être transférable à d'autres territoires.

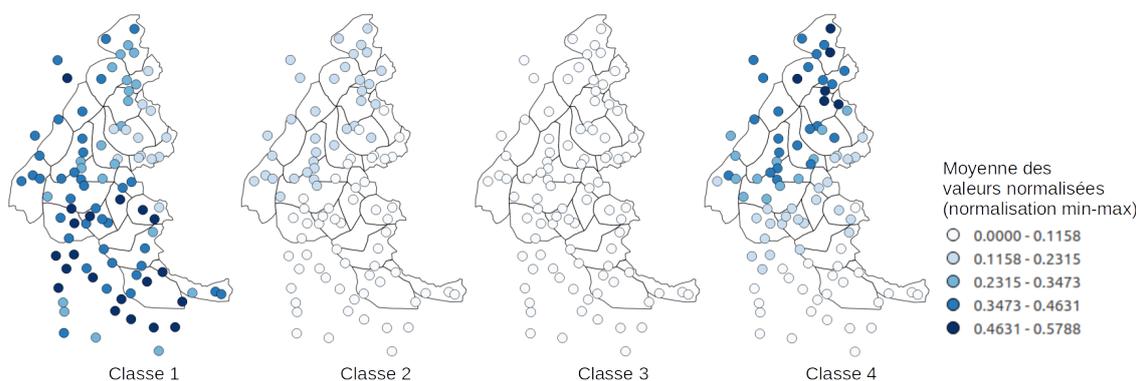


Figure 3.20 – Classification (ACP  $\rightarrow$  K-means) sur le jeu de données complet (i.e., 12 saisons hivernales), avec  $k = 4$

Nous présentons désormais deux cas de validation. Il faut d'abord noter que la force du processus développé est son résultat final (obtenu à travers les deux niveaux de classification et le calcul de moyennes pour générer les individus traités dans le second niveau). Cela signifie que chaque individu initial a moins d'importance que le collectif : même si certains individus sont mal classés (puisque le premier niveau ne détecte pas toujours toutes les tendances et ne classe pas systématiquement tous les individus dans la classe à laquelle ils devraient appartenir), ils ne déforment pas pour autant le résultat final.

Les deux exemples donnés ci-dessous illustrent cette affirmation. Les experts identifient les journées du 08 et 09 janvier 2018 comme deux journées affectées par un flux de type *retour d'est*. Sous cette tendance météorologique, les précipitations sont majoritairement localisées sur la partie est des Alpes françaises (la Figure 3.21 illustre cette affirmation).

Le processus développé se trompe sur la classe de ces deux individus. La localisation des précipitations du 09 janvier 2018 (voir Figure 3.21) diffère en effet du profil de la classe finale à laquelle il a contribué (voir la classe 2, Figure 3.19). De même, les précipitations du 08 janvier 2018 étaient localement importantes (plus de 60 mm, voir Figure 3.21a) tandis que le processus l'a classée dans une classe supprimée à l'issue du premier niveau de classification du fait d'un profil de précipitations trop faible en moyenne.

Nous évaluons ici si le résultat final du processus de classification multi-niveaux est valide pour correctement analyser ces deux journées et décider quelle tendance les affecte. Nous déterminons cela en comparant les profils de ces deux journées (i.e., ceux visibles en Figure 3.21b, obtenus par l'application des équations 3.2 et 3.3 sur leurs données brutes) avec ceux des quatre classes finales (CF), qui sont typiques de chacune des tendances détectées. Nous calculons alors la distance euclidienne entre tous ces profils deux à deux. Nous considérons une distance euclidienne basée sur les 90 mesures enregistrées pour la journée à étudier et les 90 valeurs associées à

chacune des classes finales, i.e., à chacune des tendances météorologiques. La journée à analyser est alors associée à la classe finale la plus proche (i.e., à la journée fictive donnée par le processus de classification multi-niveaux la plus similaire) et correspond alors à la tendance associée.

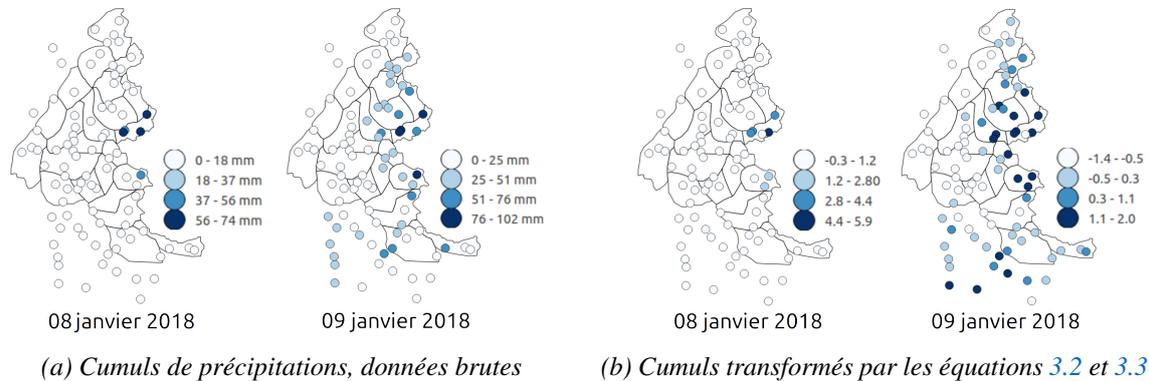


Figure 3.21 – Cumuls de précipitations et profils des 08 et 09 janvier 2018

	CF 1	CF 2	CF 3	CF 4
<b>08 janv. 2018</b>	13,71	13,94	9,97	15,07
<b>09 janv. 2018</b>	12,82	13,94	8,30	15,50

Tableau 3.2 – Distances entre les journées à analyser et les classes finales

D'après les résultats obtenus (Tableau 3.2), les deux journées sont affectées à la classe finale 3, i.e., celle qui correspond à un flux de type *retour d'est*. Cette conclusion est en accord avec notre première hypothèse et la connaissance experte dont nous disposons concernant ces deux journées. Ainsi, le résultat du processus de classification multi-niveaux est valide et permet de correctement analyser ces journées. Cette évaluation corrige la classe à laquelle elles sont affectées, même si les deux journées (initialement mal classées dès le premier niveau du processus) ont contribué de façon erronée au résultat final. Cela montre le poids du collectif et souligne la validité du résultat final donné par le processus développé.

### Gestion des données manquantes

Individus	Station 1	Station 2	...	Station x	...	Station 23
Variables ▾						
Jour 1						
Jour 2						
...						
Jour x						
...						
Jour 15						

Figure 3.22 – Représentation schématique d'un jeu de données avec donnée manquante

Les données dont nous disposons sont entachées de valeurs manquantes. Dans le cadre du processus présenté ci-dessus, nous avons comblé chaque valeur manquante, donc chaque cellule vide du jeu de données (i.e., croisement individu-variable), par la valeur moyenne de la variable dont il est question (i.e., dans notre contexte, la valeur moyenne de la station de mesure), calculée sur l'ensemble des individus du jeu de données (i.e., ici les journées) non impactés par une valeur manquante.

Dans l'extrait illustré dans la figure ci-dessus (Figure 3.22), si la cellule colorée en rose est manquante, la valeur estimée qui lui sera associée sera la valeur moyenne de la Station 2, calculée à

partir de l'ensemble des 14 journées restantes (sous condition qu'elles disposent toutes de valeurs), soit la moyenne des journées 2 à 15.

D'autres façons de gérer les données manquantes peuvent cependant être envisagées. Nous les présentons en Annexe C et les testons sur un jeu de données réel afin d'en évaluer l'impact sur le résultat. Ces tests montrent que, puisque notre jeu de données est faiblement impacté par les valeurs manquantes, l'imputation classique, qui consiste à remplacer les valeurs manquantes par la moyenne de la variable considérée, est adaptée pour satisfaire les objectifs fixés.

### 3.3.2 Estimation de la criticité d'une avalanche associée à une situation

À l'issue du processus de classification multi-niveaux nous obtenons une première idée des étendues qui sont principalement affectées par les précipitations pour les différentes tendances météorologiques détectées (pour rappel, voir Figure 3.19). Pour définir et évaluer le paramètre  $C3.x_1$  *Localisation du critère C3 Observations d'avalanches récentes*, il est nécessaire d'estimer les différences de conditions (plus ou moins favorables) associées aux différentes étendues, pour chaque tendance. Cela permet de déterminer la zone d'influence d'une observation d'avalanche. Les étendues présenteront des conditions plus ou moins favorables selon les quantités totales de précipitations qu'elles reçoivent, i.e., en fonction de la surcharge nouvelle (puisque les précipitations sont actuellement la seule donnée que nous prenons en compte pour estimer la notion de conditions similaires dans le processus de classification multi-niveaux).

#### Estimation des conditions des étendues du fait de la surcharge sous différentes tendances

Afin de définir les conditions du fait de la surcharge, les étendues associées à d'importants cumuls seront associées aux conditions les plus défavorables, tandis que les étendues qui ont reçu les plus faibles précipitations correspondront aux conditions les plus favorables.

Pour cela, nous avons appliqué une méthode de classification sur les 90 stations de mesure réparties sur l'ensemble des Alpes françaises. Par extension, nous avons identifié les étendues qui reçoivent des précipitations dans des cumuls similaires. Dans cette section, les individus que nous classons sont désormais les stations de mesure. Pour chaque classification, nous travaillons avec une unique variable : le centroïde de la classe finale obtenue par le processus de classification multi-niveaux. Nous réalisons alors quatre classifications successives pour extraire les criticités des étendues sous les quatre tendances finales détectées.

Puisque nous savons le nombre de classes que nous recherchons, nous exploitons directement l'algorithme K-means, sans nécessité de recourir au préalable à la CAH. Nous souhaitons en effet extraire trois classes pour chacune des tendances afin d'identifier trois niveaux graduels décrivant les conditions, des plus favorables aux plus défavorables : *conditions les plus favorables*, *conditions intermédiaires* et *conditions les plus défavorables*. Nous exploitons alors K-means en fixant  $k = 3$ . Nous laissons ici une initialisation aléatoire des trois centroïdes initiaux dans l'algorithme. Puisque différentes initialisations peuvent conduire à différents résultats, nous lançons alors l'algorithme 100 fois et conservons le résultat qui maximise le ratio :  $\frac{bSS}{tSS}$ , où  $bSS$  (pour *between sum of squares*) est l'inertie inter-classes et  $tSS$  (pour *total sum of squares*) l'inertie totale. Ceci permet de conserver la classification où les classes sont les plus différentes les unes des autres, et les individus au sein d'une classe les plus similaires les uns des autres. Notons qu'avec 10 lancés aléatoires nous obtenons déjà le même résultat de classification, et à l'issue de 1000 lancés c'est toujours le même résultat final qui est obtenu. 100 exécutions différentes est donc un nombre d'essai raisonnable pour capturer cette classification. Notons qu'exploiter la succession CAH  $\rightarrow$  K-means à ce stade n'est pas judicieux puisque la CAH ne suggère pas automatiquement, pour chacune des quatre tendances, de recourir à trois classes (mais elle suggère parfois 3, parfois 4 classes selon la tendance analysée). De plus, s'il est possible de forcer le système à couper l'arbre obtenu à trois classes pour initialiser K-means, cela ne garantit en rien que l'initialisation soit l'une de celles

permettant à l'issue de K-means d'obtenir les classes les plus homogènes et les plus différentes les unes des autres.

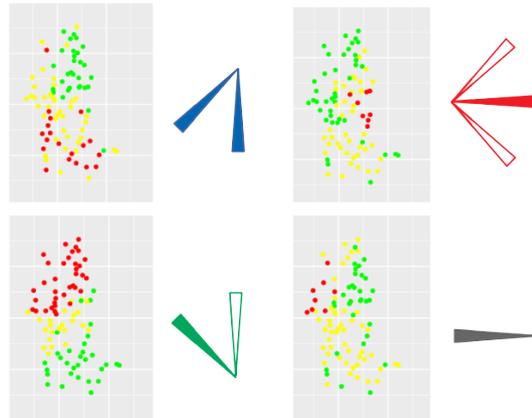


Figure 3.23 – Trois zones graduelles (rouge, jaune et vert) pour chaque tendance détectée, et direction du vent (direction principale et directions associées)

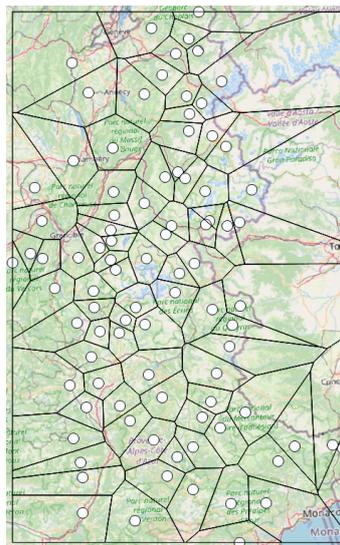


Figure 3.24 – Diagramme de Voronoï obtenu à parti des 90 stations de mesure

En appliquant ainsi l'algorithme K-means sur chacune des quatre tendances détectées, nous obtenons trois zones graduelles pour chaque tendance séparément (Figure 3.23). Le résultat de la classification des stations (ponctuel) doit ensuite être extrapolé aux étendues (surfactive). Les limites de zones, séparant les stations associées à des classes différentes (rouge, jaune, verte), doivent alors être déterminées. Nous proposons pour cela d'exploiter un diagramme de Voronoï (voir Figure 3.24). Ce type de diagramme découpe le plan en polygones dont chacun contient un seul élément ponctuel (ici une seule station). Chaque polygone contient l'ensemble des points qui sont plus proches de la station qu'il inclut que de n'importe quelle autre station. Ainsi, chaque segment de polygone représentera la ligne d'équidistance entre les deux stations les plus proches. Dans chaque polygone, la valeur des points du plan prendra la valeur de la station incluse dans le polygone. Le découpage des différentes zones pourra alors suivre les segments séparant des polygones de classes distinctes. Notons que, quelle que soit la technique utilisée pour convertir le résultat ponctuel en un résultat surfactive, plus le réseau de stations de mesure sera dense et plus l'information résultante sera précise. Par ailleurs, en l'absence d'informations plus précises,

il pourra être envisagé de tenir compte des imprécisions et incertitudes liées au positionnement des limites.

En suivant cette méthode, la représentation des étendues associées à des conditions plus ou moins favorables, pour chacune des quatre tendances, est donnée en Figure 3.25. Les quatre résultats émergents reflètent bien les premiers résultats préalablement obtenus (voir Figure 3.19) et permettent l'identification des zones principalement impactées par les flux de Sud / Sud-Ouest (en bleu), de Nord Ouest (en vert), d'Est (en rouge) et d'Ouest (en gris).

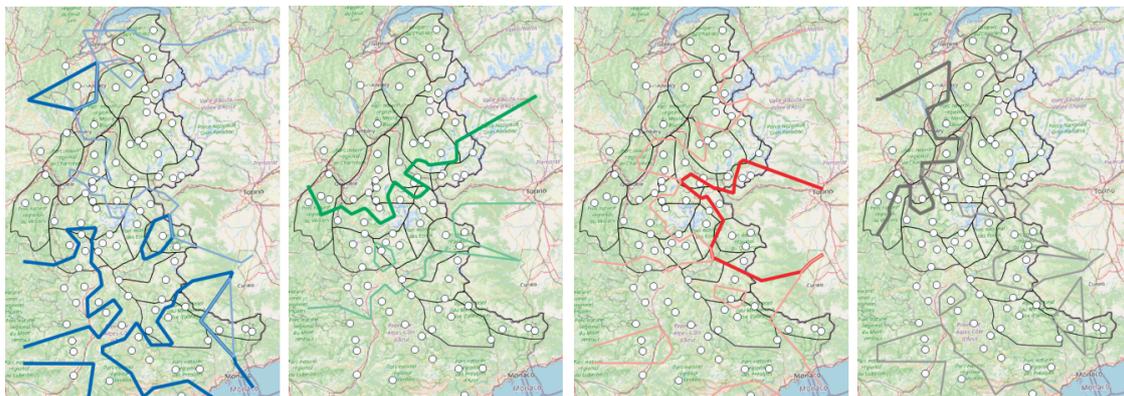


Figure 3.25 – Visualisation des conditions plus ou moins favorables des différentes étendues selon les quatre tendances détectées, zonage à partir d'un diagramme de Voronoï

L'inconvénient de la technique utilisée ici réside dans le fait que des zones associées à des conditions très distinctes (rouge, conditions les plus défavorables vs vert, conditions les plus favorables) peuvent se toucher sans laisser place, entre les deux, à une zone de conditions intermédiaires (jaune). Ceci n'est donc pas cohérent avec le fait de travailler sur un phénomène naturel dont les variations sont progressives. Ainsi, pour cette raison et du fait des imprécisions évoquées ci-avant, à proximité des limites, nous ne pouvons pas garantir le type de conditions associé à l'étendue étudiée, et ce a fortiori entre deux zones de fort contraste. À terme, des transitions plus progressives entre les zones voire une extrapolation graduelle de la valeur à associer à chaque point (plutôt qu'une valeur unique par polygone) devront être proposées.

### Estimation automatique de la situation

Les étendues définies ci-dessus interviennent directement dans la description du paramètre  $C3.x_1$  *Localisation*. Pour renseigner ce paramètre, il est alors nécessaire de connaître : 1) quelle est la tendance qui affecte la journée considérée, 2) où est localisée l'avalanche récente observée, et 3) quelle est la zone fréquentée par le skieur. Ceci signifie que pour une observation d'avalanche récente, le système doit déterminer la situation en cours (i.e., la tendance associée à la journée qui a conduit à l'avalanche). Ainsi, le zonage déterminé pour la tendance correspondante (voir Figure 3.25) sera celui qui fait sens pour la situation à évaluer. Pour finir, selon la localisation de l'avalanche observée et la zone fréquentée par le skieur, la valeur de la criticité de l'avalanche (donc la valeur finale à attribuer au paramètre  $C3.x_1$  *Localisation*, parmi les trois valeurs possibles *Pas critique*, *Moyennement critique* et *Critique*) sera déterminée.

Nous nous concentrons donc ici sur l'analyse d'une seule journée. Pour estimer la tendance associée à cette journée, à nouveau et comme nous l'avons vu précédemment, nous calculons la distance euclidienne entre la journée à étudier et chacune des quatre tendances détectées. Nous affectons ensuite la journée à la tendance la plus proche. Ainsi, pour une journée donnée, l'utilisateur connaît quelles sont les étendues dont les conditions sont plus ou moins favorables, d'après la situation météorologique (rouge signifie conditions les plus défavorables, jaune signifie conditions

intermédiaires et vert signifie conditions les plus favorables).

Ainsi, sur la base des conditions météorologiques (i.e., les cumuls des précipitations reçues sur les 90 stations de mesure pour une journée), le processus estime la tendance et un zonage distinguant des conditions plus ou moins favorables.

La localisation de l'observation d'avalanche et la localisation du skieur doivent alors être prises en compte pour estimer si la localisation de l'avalanche récente observée est critique ou non. L'avalanche observée n'a en effet pas nécessairement eu lieu dans la zone correspondant aux conditions les plus défavorables (i.e., la zone rouge). Si l'avalanche a lieu dans l'une ou l'autre des autres zones (jaune ou verte), cela signifie que les conditions qui ont impacté les autres étendues sont suffisantes pour causer des avalanches. Ainsi :

- Si le skieur se trouve dans une zone de fortes précipitations (i.e., zone rouge, correspondant aux conditions les plus défavorables), alors quelle que soit la localisation de l'avalanche (zones rouge, jaune ou verte), l'avalanche sera considérée comme *Critique*, puisqu'en effet, même une zone avec de plus faibles précipitations a pu générer une avalanche.
- Si, à l'inverse, le skieur se trouve dans la zone de faibles précipitations (i.e., zone verte, correspondant aux conditions les plus favorables), alors une avalanche observée dans la zone rouge n'est pas un indicateur significatif de danger pour la zone fréquentée par le skieur, la zone rouge étant soumise à des conditions nettement plus défavorables (l'avalanche y est normalement attendue); l'avalanche ne sera donc pas alarmante pour le skieur et sera considérée comme *Pas critique*. Une avalanche dans la zone verte, soumise aux mêmes conditions que la zone fréquentée par le skieur, sera quant-à elle un très bon indicateur du danger en cours et sera considérée comme *Critique*. Par mesure de précaution, une avalanche située dans la zone jaune, intermédiaire (donc moins alarmante qu'une avalanche se déclenchant dans la zone verte, mais plus qu'une avalanche située dans la zone rouge) sera considérée comme *Moyennement critique* (une seule zone de décalage, comparativement à une avalanche dans la zone rouge, deux zones de décalage).
- Si le skieur se trouve dans la zone intermédiaire (i.e., zone jaune), alors, pour les mêmes raisons que celles évoquées dans les deux cas précédents : une avalanche localisée dans les zones jaune ou verte sera considérée comme *Critique*; une avalanche localisée dans la zone rouge, aux conditions plus défavorables, sera alors considérée que comme *Moyennement critique* (conditions plus défavorables, mais une seule zone de décalage).

Nous avons donc défini une approche rigoureuse et transparente permettant une première estimation du paramètre  $C3.x_1$  *Localisation* du critère  $C3$  *Observations d'avalanches récentes*. L'approche proposée est suffisamment générique pour être prise en compte dans la plupart des méthodes d'aide à la décision existantes dans le domaine de l'estimation du risque lié aux avalanches [Landrø2020a]. Il s'agit de la première approche qui permet de quantifier la zone d'influence d'une avalanche observée, permettant alors de fixer les limites des zones ayant connu des conditions similaires, voire encore plus défavorables, à celles ayant conduit à l'observation d'une avalanche récente. Notons cependant que cette estimation est le résultat d'une première proposition de développements, mais que la valeur actuellement donnée au paramètre  $C3.x_1$  *Localisation* ne peut pas être directement exploitée dans le système global. En effet, l'étude complète de ce paramètre présente aujourd'hui des limitations qui doivent encore faire l'objet de travaux de développements futurs pour qu'il puisse être directement intégré et pris en compte dans le système global.

À l'issue de ce chapitre, nous atteignons un stade où les éléments de base de la phase de détection de la démarche CRISTAL sont clairement explicités. Les critères ont été décomposés (voir Chapitre 2) et certains sous-critères ou paramètres, qui ne sont pas directement tirés de valeurs expertes, ont fait l'objet de développements additionnels, présentés dans ce chapitre. Si certains éléments doivent encore être approfondis et explicités dans de futurs travaux, de nombreux sous-

critères et paramètres sont désormais bien compris et évaluables. D'autres, dont les travaux présentent encore des limites, ont été traités mais doivent faire l'objet de prochaines améliorations. Le tableau 3.3 donne une synthèse de cette vision d'ensemble.

Les sous-critères et paramètres du critère C2 *Inclinaison des pentes* sont tous explicités et évaluables. Les règles d'agrégation qui n'ont pas encore été présentées seront développées au Chapitre 4. Ce critère peut alors être pris en compte de bout en bout dans le système global.

Le critère C3 *Observations d'avalanches récentes* présente quant à lui un stade moins avancé. Le paramètre C3.x<sub>1</sub> *Localisation*, en effet, bien qu'ayant fait l'objet de développements spécifiques présentés dans ce chapitre, ne permet pas actuellement de traduire l'ensemble de la complexité et de la variabilité naturelle du phénomène. Sa réalité est en effet plus complexe que ce que les premiers résultats obtenus permettent de prendre en considération. De plus, le paramètre C3.x<sub>2</sub> *Similitude*, complexe lui-aussi, n'a actuellement pas fait l'objet de développement au cours de nos travaux.

Nous avons donc achevé de répondre à la première question de recherche qui vise à proposer une façon d'estimer et évaluer les critères principaux de CRISTAL. Ces critères peuvent alors être combinés dans le système global pour aller vers le résultat final : le mode de vigilance à adopter sur le terrain permettant d'éviter tout effet de surprise au regard de la situation en cours (analysée sur la base des cinq critères de la démarche, voir Chapitre 2). Le prochain chapitre (Chapitre 4) s'attarde donc à présenter une vision d'ensemble du système de fusion développé pour l'aide à l'évaluation du mode de vigilance obtenu en phase de détection de la démarche CRISTAL et faire émerger les règles de combinaison qui permettent d'obtenir ce résultat final.

3.3. Avalanches récentes et localisation du danger, partie 2 : Estimation de la criticité d'une avalanche du fait de la localisation

Critères	Sous-critères	Paramètres	Sous-paramètres	...
Inclinaison des pentes	CLPA	/	/	/
	Pentes fréquentées	/	/	/
	Pentes en amont	/	/	/
	Peut atteindre le skieur	Dénivelé de pente >30°	/	/
		Distance horizontale	/	/
	Pentes en aval	/	/	/
	Peut emporter le skieur	Distance	/	/
		Inclinaison	/	/
Surface mobilisable				
Observations d'avalanches récentes	$n \times$ Criticité	Localisation	Tendance météorologique	
			Localisation avalanche	
			Localisation skieur	
	Similitude	Altitude		
		Exposition		
	Taille	Largeur pente	/	
		Largeur avalanche	/	
Épaisseur avalanche		/		
Récence				
Augmentation de température, fonte	Augmentation de température			
	Humidification du manteau neigeux			
	Épaisseur croûte de regel			
	Effet positif			
Surcharges nouvelles	Vent			
	Neige			
	Pluie			
	Ancienneté			
Couche fragile enfouie	Présence	Type d'avalanches locales observées	/	/
		Couche fragile	/	/
	Efficacité	Type d'avalanches locales observées	/	/
		Propagation (mesure)	/	/
		Propagation (caractérisation)	/	/
	Extrapolation			

Cellule verte : automatiquement évaluable ; Cellule jaune : premiers développements réalisés, mais évaluation automatique limitée ; Cellule blanche : description théorique, évaluation non investiguée. Éléments **verts** automatiquement évaluable sur la base de règles de combinaison présentées au Chapitre 4.

Tableau 3.3 – Synthèse des sous-critères, paramètres et sous-paramètres automatiquement évaluable



# 4

## Système de fusion pour l'aide à l'évaluation du mode de vigilance

---

*Ce chapitre présente le système global d'aide à l'évaluation du mode de vigilance ainsi que la méthode mise en œuvre pour sa conception : recueil d'expertise, phases de test et amélioration continue. Nous présentons ensuite les différents niveaux de combinaison qui composent le système : d'une part le passage des cinq critères aux modes de vigilance, d'autre part les autres niveaux de combinaison nécessaires, permettant d'obtenir les critères principaux à partir de sous-critères et paramètres. Nous présentons le cas du critère C2 qui a été principalement développé dans nos travaux, correspondant aux prédispositions liées au terrain. Enfin, une mise en œuvre et validation du système est proposée dans ce chapitre. Ainsi, le Chapitre 4 répond à la seconde question de recherche qui consiste à dégager les règles de combinaison permettant d'obtenir un résultat global.*

---

### Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Système de fusion hiérarchique pour l'aide à la décision</b>	<b>110</b>
4.1.1	Système global pour l'aide à la décision : généralités	110
4.1.2	Système hiérarchique : plusieurs niveaux de combinaison	113
4.1.3	Intérêt de la théorie des sous-ensembles flous	114
4.1.4	Méthode de conception du système de fusion	127
<b>4.2</b>	<b>Système de fusion : des éléments de base aux modes de vigilance</b>	<b>130</b>
4.2.1	Des cinq critères vers les modes de vigilance	130
4.2.2	Niveaux d'agrégation préalables	134
<b>4.3</b>	<b>Mise en œuvre et validation</b>	<b>138</b>
4.3.1	Discussion : peut-on valider le système ?	138
4.3.2	Cas concrets et amélioration continue	139
4.3.3	Validation du système global	147
4.3.4	Mise en œuvre et outils développés	156

---

## 4.1 Système de fusion hiérarchique pour l'aide à la décision

### 4.1.1 Système global pour l'aide à la décision : généralités

Dans ce chapitre, nous présentons la combinaison de l'ensemble des éléments présentés aux Chapitres 2 et 3 c'est-à-dire l'ensemble des éléments qui décrivent, décomposent et permettent d'évaluer les critères principaux de la démarche CRISTAL. Nos travaux conduisent donc à combiner les sous-paramètres, paramètres, sous-critères et critères obtenus en un résultat final, le mode de vigilance à adopter sur le terrain soumis au risque d'avalanche. Nous faisons donc émerger, dans ce chapitre, les règles de combinaison permettant de savoir quel mode de vigilance est adapté à la situation en cours au vu des critères observés et mesurés. Les travaux présentés ici correspondent donc à l'étape de combinaison de l'information.

Puisque les cinq critères principaux permettant l'évaluation du mode de vigilance sont obtenus à partir de nombreux sous-paramètres, paramètres puis sous-critères (voir Chapitres 2 et 3), le système de fusion développé a la particularité de s'établir en plusieurs niveaux successifs (voir Section 4.1.2). C'est pourquoi nous parlons de système de fusion *hiérarchique*. De plus, comme nous l'avons vu au Chapitre 2, notre système exploite la théorie des sous-ensembles flous pour représenter la gradualité inhérente aux différents sous-paramètres, paramètres, sous-critères et critères. L'intérêt de l'exploitation de la théorie des sous-ensembles flous, dans notre contexte, sera présentée en Section 4.1.3.

Dans nos travaux, nous modélisons ainsi un système de fusion d'informations qui s'intègre dans l'une des étapes d'une méthode plus globale d'aide à la décision en terrain soumis au risque d'avalanche. Son objectif est en effet de faire évoluer la *démarche* CRISTAL (présentée au Chapitre 1) en une *méthode* d'aide à la décision. Actuellement, CRISTAL est une démarche puisqu'elle ne présente pas de cadre explicitant le passage des six critères sur lesquels elle repose aux quatre modes de vigilance à obtenir en sortie (voir Chapitre 1). Rappelons que ces modes de vigilance permettent de guider l'utilisateur vers des choix multiples en lui suggérant un comportement à adopter qui soit le plus possible adapté à la situation en cours. Pour mémoire, nous ne considérons dans nos travaux que cinq critères sur les six de la démarche CRISTAL, laissant à part le niveau de danger du BERA qui n'est pas un facteur contributeur des avalanches et correspond lui-même déjà à une évaluation de la situation en cours et à l'agrégation de plusieurs éléments (voir Chapitre 2.) Nous développons donc, pour compléter CRISTAL et afin d'en faire une méthode, un système de fusion hiérarchique combinant les nombreux sous-paramètres en paramètres, puis en sous-critères pour obtenir enfin les cinq critères d'entrée principaux d'un système global pour l'aide à l'évaluation du mode de vigilance.

Les modes de vigilance qu'il est possible d'obtenir à l'issue du système de fusion d'informations sont en effet ceux de la démarche CRISTAL, présentés en Figure 4.1. Dans le mode de vigilance *Détendu* (vert), aucune avalanche n'est possible dans le secteur, aucun signe de danger n'est donc détecté. Dans le mode de vigilance *Méfiant* (orange), certains signes de danger peuvent être identifiés et une avalanche est possible "*là-bas*", i.e., dans le secteur, mais pas au niveau de l'itinéraire envisagé, donc aucun risque n'est encouru par le skieur. Dans le mode de vigilance *Alerté* (rouge), à nouveau, des signes de danger peuvent être identifiés mais une avalanche est désormais possible "*ici*", i.e., dans la zone traversée par l'itinéraire du skieur, ce dernier est donc soumis à un risque. Enfin, dans le mode de vigilance *Hasardeux* (violet), des signes de danger sont là-aussi identifiés et l'avalanche, en plus d'être possible ici, peut être de grande ampleur, rendant impossible la réduction du risque. À chacun des modes de vigilance présentés correspond en effet différents comportements qu'il est possible d'adopter (pour mémoire, voir Figure 1.3 du Chapitre 1). Ces différents comportements prennent part à la phase d'analyse de CRISTAL et permettent, selon les mesures que peut ou que souhaite prendre l'utilisateur, une éventuelle augmentation du mode de vigilance requis. Ces comportements sont traduits par les trois verbes d'action suivants : *éviter*, *réduire* et *changer d'itinéraire*. Dans le deuxième mode de vigilance (i.e., *Méfiant*), l'utilisateur doit prendre des mesures d'évitement du danger (la situation étant en effet caractérisée par

un danger pouvant être évité). Dans les deux modes suivants (i.e., *Alerté* et *Hasardeux*), le skieur est désormais exposé au danger. En mode *Alerté*, il doit donc prendre des mesures de réduction des potentielles conséquences du risque ; en mode *Hasardeux*, aucune action de l'utilisateur n'est possible sur l'itinéraire prévu et il ne peut que changer de projet. La démarche CRISTAL permet donc de cheminer vers une bonne décision et ce à travers trois étapes clef (Figure 4.2) : la détection du mode de vigilance adapté à la situation, l'analyse et la décision. Un exemple plus précis sera présenté dans la Section 4.1.3. Rappelons qu'en phase d'analyse (i.e., après l'évaluation du mode de vigilance adapté à la situation), les utilisateurs chemineront vers leur décision en fonction de leur capacité d'évitement du danger et de réduction du risque. Dans la phase d'analyse, l'évaluation de cette capacité est liée au niveau physique et technique des skieurs, aux facteurs humains, à la configuration du terrain pouvant limiter les possibilités pour un groupe de s'échapper ou contenir des pièges aggravant les conséquences d'une éventuelle avalanche, etc. C'est sur cette base qu'ils prendront alors leur décision quant au comportement à adopter sur le terrain.

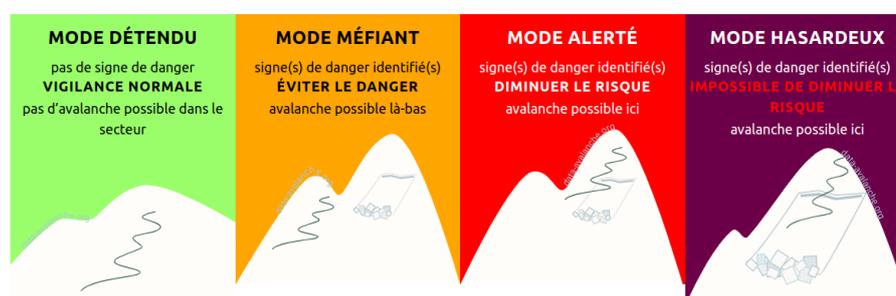


Figure 4.1 – Les quatre modes de vigilance de la démarche CRISTAL

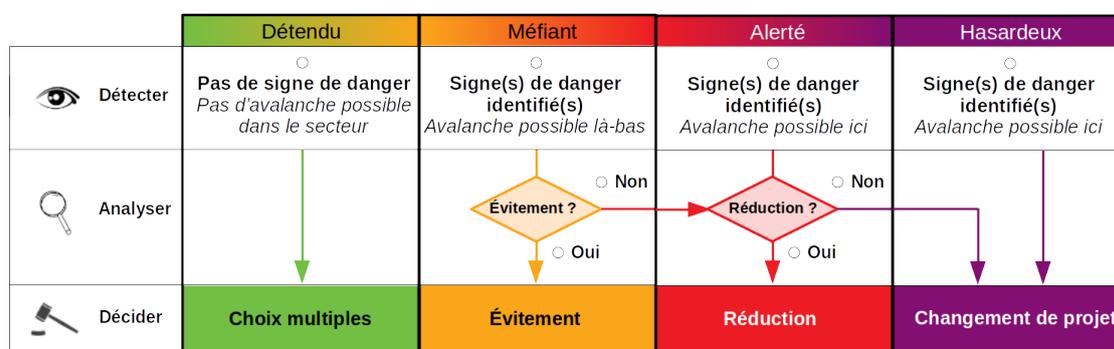


Figure 4.2 – Les étapes de la démarche CRISTAL

Précisons que l'estimation du mode de vigilance, de par les critères combinés dans le système, a une portée d'ordre local. Le mode de vigilance obtenu à l'issue de la phase de détection n'a en effet pas de valeur pour un itinéraire dans son ensemble, mais bien pour une portion d'itinéraire aux caractéristiques constantes. La portée de l'évaluation est donc très localisée, contrairement à l'estimation du risque communiquée par le BERA qui est d'ordre régional, correspondant à un niveau de risque moyen valable pour un massif donné. Ici, l'estimation cherche davantage à extraire le niveau de risque maximal qui peut se produire localement afin d'aider l'utilisateur dans sa prise de décision sur le terrain. Ainsi plusieurs modes de vigilance se succèdent au cours d'une sortie envisagée par un skieur. Ceci est du à la variation des valeurs prises par les cinq critères analysés tout au long de l'itinéraire choisi. La Figure 4.3 illustre ce principe : sur cet itinéraire, au jour du 18 décembre 2020, du fait du terrain et des conditions nivo-météorologiques locales, le skieur doit faire appel à différents modes de vigilances successifs.

Un système de fusion d'informations repose sur les principaux éléments que sont l'extraction, la représentation et la combinaison de l'information [Varshney1997]. Ces principaux blocs

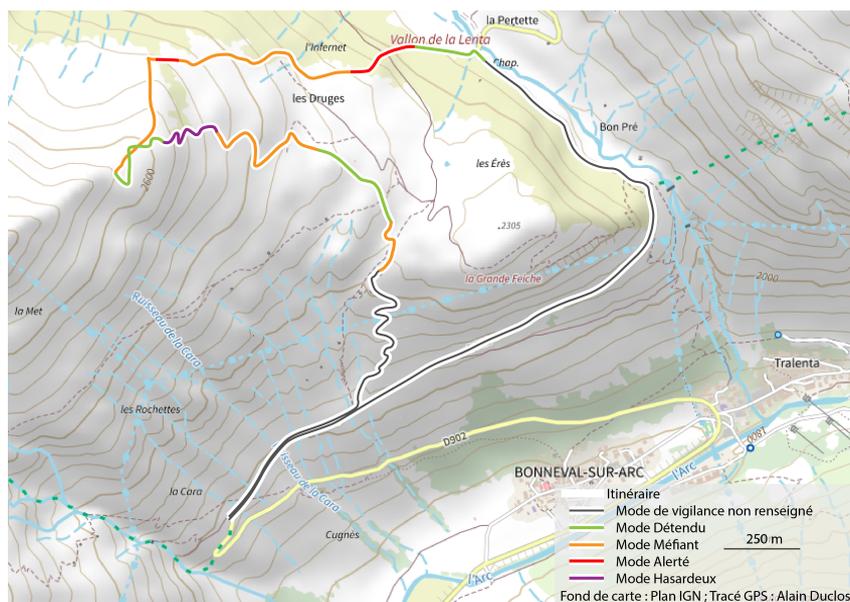


Figure 4.3 – Exemple d'un itinéraire et ses différents modes de vigilance successifs : Bonneval-sur-Arc, la Met - 18 décembre 2020

conduisent ensuite à la décision et peuvent éventuellement être complétés par l'explication du résultat de la combinaison. L'étape d'explication joue un rôle essentiel dans le système développé, permettant à l'utilisateur de comprendre quels ont été les critères exploités (i.e., appelés dans les règles mises en œuvre) et quels sont ceux qui ont joué un rôle prépondérant lors de l'évaluation du résultat et d'affiner voire corriger l'évaluation. Tous les critères n'interviennent en effet pas dans toutes les règles, certains n'ayant aucune influence sur la valeur de sortie associée à la règle. De même, au sein des critères appelés dans une règle donnée, la modification de la valeur attribuée à certains critères peut être sans influence sur le résultat ; dans ce cas, ces critères ne sont pas considérés comme prépondérants, puisque ce ne sont pas eux qui jouent un rôle majeur sur la valeur de sortie. À partir de cette information, l'utilisateur peut alors mettre en œuvre une seconde évaluation et apporter d'éventuelles corrections aux valeurs attribuées aux critères prépondérants. Cette phase d'explication et de réévaluation des principaux éléments par l'utilisateur induit, à chaque niveau du système hiérarchique, une boucle de rétroaction. Grâce à ces boucles de rétroaction, le système développé intègre une part de flexibilité. Ce dernier ne communiquera pas seulement un résultat fixe et imposé mais permettra à l'utilisateur de prendre part à l'évaluation et de s'investir davantage. L'utilité de l'étape d'explication sera démontrée, dans la suite de ce chapitre, sur la base d'exemples concrets discutés en Section 4.3.3, à l'issue de la phase de validation.

Dans notre contexte, la phase de décision n'est pas incluse dans le système développé, puisqu'elle correspond aux étapes d'analyse et de décision de la démarche CRISTAL, phases bien identifiées et explicitées par data-avalanche. Ainsi le système de fusion d'informations développé dans ces travaux correspond à la seule phase de détection de la démarche CRISTAL. Pour prendre sa décision, l'utilisateur doit donc, à l'issue du système développé, conduire les deux phases d'analyse et de décision de la démarche CRISTAL.

Jusqu'à présent, le Chapitre 2 a d'abord proposé l'extraction de l'information, en explicitant les cinq critères analysés et en faisant émerger l'ensemble des sous-critères et paramètres à prendre en compte. Le Chapitre 3, ensuite, a traité du bloc de représentation de l'information. Enfin, ce chapitre vise à proposer la phase de combinaison de l'information.

Pour résumer, le système développé prend donc part à la démarche CRISTAL en se focalisant sur sa phase de détection. Il permet une évaluation objective du mode de vigilance à adopter sur le terrain. Pour cela, il combine à travers plusieurs niveaux de combinaison (voir Section 4.1.2), cinq

critères préalablement décomposés, ces critères étant décrits de manière floue (voir Section 4.1.3). Ce système global, qui peut être caractérisé de système de fusion hiérarchique, est représenté par la Figure 4.4. Elle illustre les différentes phases d'un système de fusion, l'aspect hiérarchique du système développé ainsi que son intégration dans la démarche CRISTAL. C'est cette démarche globale qui permet l'aide à la décision. L'utilisateur prend en effet sa décision finale, en analysant s'il peut (et/ou s'il veut) éviter le danger ou réduire le risque.

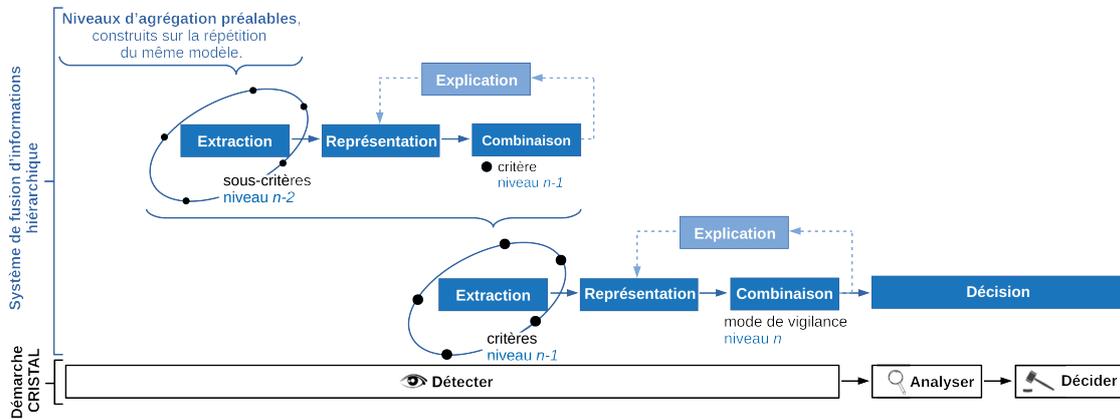


Figure 4.4 – Système de fusion d'informations développé et intégration dans la démarche CRISTAL

#### 4.1.2 Système hiérarchique : plusieurs niveaux de combinaison

Pour conserver l'objectif de combiner un faible nombre de critères (principe évoqué par plusieurs auteurs) et établir plus aisément les règles expertes associées, nous suggérons l'utilisation de plusieurs agrégations successives. Le système global pour l'aide à la décision, que nous proposons pour améliorer la phase de détection de la démarche CRISTAL, est donc basé sur plusieurs niveaux de combinaison. Ainsi, pour être cohérent avec le premier objectif de cette démarche, qui réside dans le fait de combiner un faible nombre de paramètres, nous avons décidé de ne pas agréger tous les éléments émergents des critères en une seule fois. Il n'est pas possible, en effet, de passer en une seule étape des éléments les plus fins, dégagés au Chapitre 2 (pour mémoire, voir Tableau 2.3), aux modes de vigilance. Les éléments sont trop nombreux pour être combinés en une seule agrégation à travers des règles claires, facilement interprétables i.e., qui ne combinent pas directement un nombre trop important d'éléments dont il serait impossible pour un être humain de discerner le rôle joué par chacun d'eux et la façon dont ils agissent sur la valeur de sortie de la règle. Au contraire, nous proposons de travailler critère par critère et de réaliser des agrégations successives. Le système est donc composé de plusieurs niveaux, car il ne s'agit plus, en effet, de passer des six paramètres de CRISTAL (desquels nous avons extrait aujourd'hui nos cinq critères) aux quatre modes de vigilance (ce qui correspond à la vision initiale de la démarche CRISTAL), mais il s'agit bien de partir des sous-critères, paramètres voire parfois sous-paramètres, pour obtenir le mode de vigilance détecté.

Appelons  $n$  le niveau d'agrégation qui conduit des critères ( $C_2, C_3, \dots, C_6$ ) aux modes de vigilance. Ensuite, pour chaque critère, la combinaison qui conduit des sous-critères au critère est appelée  $n-1$ . Pour les critères décomposés jusqu'en sous-paramètres, l'agrégation commencera au niveau  $n-3$ . Cela concerne par exemple le critère  $C_3$  *Observations d'avalanches récentes* à partir duquel quatre niveaux d'agrégation successifs sont nécessaires pour atteindre le résultat final (i.e., les modes de vigilance). Cependant, comme mentionné au Chapitre 2, nous ne sommes pas en mesure actuellement d'affirmer l'absence de niveaux supplémentaires. Par conséquent, d'autres niveaux d'agrégation pourraient être ajoutés par la suite au système. Nous notons le dernier niveau possible  $n-i$ . Les éléments les plus fins dont nous disposons aujourd'hui sont les sous-paramètres,

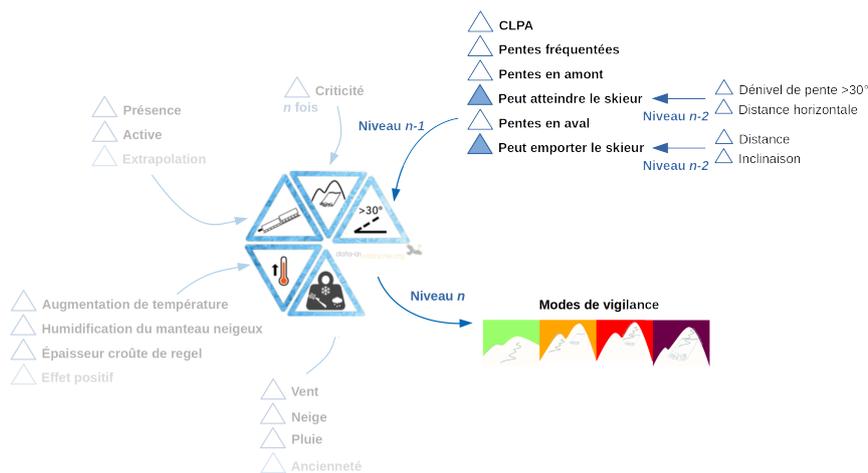


Figure 4.5 – Illustration des niveaux de combinaison successifs sur la base du critère C2

ainsi nous explicitons actuellement quatre niveaux de combinaison au maximum. Les niveaux additionnels susceptibles d'émerger ne sont pas décrits ci-dessous.

Les différents niveaux d'agrégation sont alors comme suit :

- passage des sous-paramètres aux paramètres, niveau  $n-3$  ;
- passage des paramètres aux sous-critères, niveau  $n-2$  ;
- passage des sous-critères aux critères, niveau  $n-1$  ;
- passage des critères aux modes de vigilances, niveau  $n$ .

Prenons le critère C2 pour citer un exemple (voir Figure 4.5). La combinaison de niveau  $n-2$  permet le passage des paramètres C2.6<sub>1</sub> *Distance* et C2.6<sub>2</sub> *Inclinaison* au sous-critère C2.6 *Peut emporter le skieur*. Ensuite, la combinaison de niveau  $n-1$  permet le passage des six sous-critères C2.1 *CLPA*, C2.2 *Pentes fréquentées*, C2.3 *Pentes en amont*, C2.4 *Peut atteindre le skieur*, C2.5 *Pentes en aval* et C2.6 *Peut emporter le skieur* vers le critère C2 *Inclinaison des pentes*. Enfin, la combinaison de niveau  $n$  permet le passage des cinq critères C2 *Inclinaison des pentes*, C3 *Observations d'avalanches récentes*, C4 *Augmentation de température, fonte*, C5 *Surcharges nouvelles* et C6 *Couche fragile enfouie* vers les modes de vigilance obtenus en sortie.

La Figure 4.6 met en évidence le principe du système global pour l'aide à la détection sur la base des niveaux d'agrégation  $n$ ,  $n-1$  et  $n-2$ . En réalité, le principe se répète de façon similaire jusqu'au niveau  $n-i$ . Seule la représentation de ces  $i+1$  niveaux permettrait de donner une vue d'ensemble du système global. La Figure 4.6 met particulièrement en avant le niveau  $n$  qui y est davantage détaillé, illustrant le système basé sur des règles de combinaison expertes.

Pour résumer, plusieurs niveaux d'agrégation successifs doivent être mis en œuvre afin de composer de bout en bout le système de fusion d'informations développé permettant la phase de détection (pour rappel, voir Figure 4.4) de la méthode globale d'aide à la décision. Ceci permet de satisfaire l'un des principes de base de la démarche CRISTAL, principe souligné par d'autres auteurs dans la littérature, dont l'objectif est, à chaque fois, de ne combiner qu'un faible nombre de critères. De cette manière, chaque combinaison reste aisément compréhensible et interprétable par un être humain, ce qui signifie que l'utilisateur peut comprendre la règle et les éléments qui ont eu de l'importance sur le résultat final.

### 4.1.3 Intérêt de la théorie des sous-ensembles flous

Comme mentionné au Chapitre 2, nous avons choisi d'exploiter la théorie des sous-ensembles flous (voir Annexe B) pour le développement de notre système de fusion d'informations. Cela

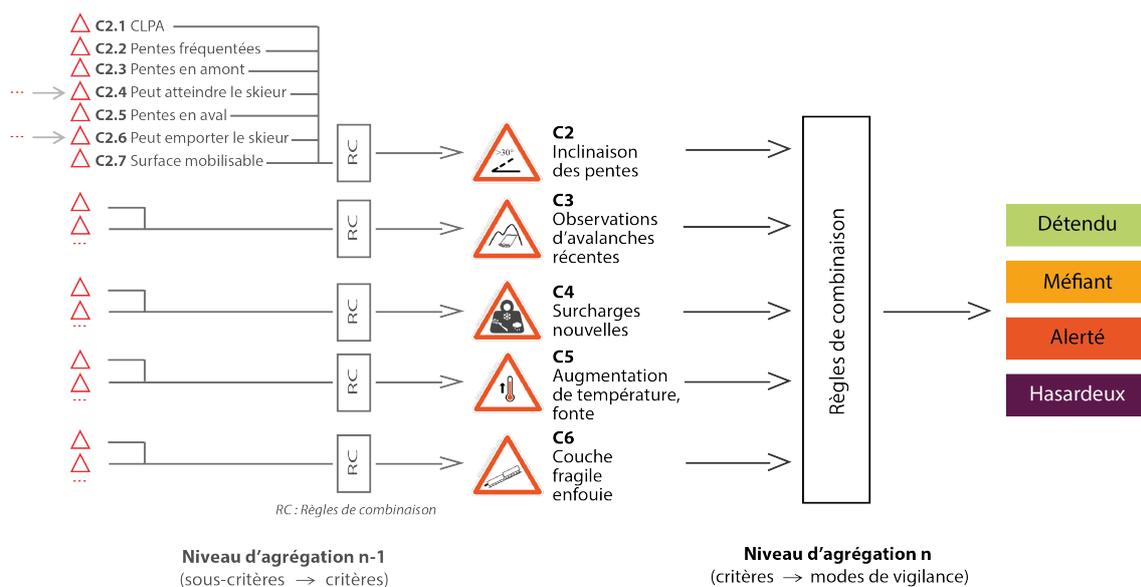


Figure 4.6 – Schéma de principe des niveaux d'agrégation du système d'aide à la détection

permet, en premier lieu, de définir le lien entre les critères et les modes de vigilance en utilisant la connaissance experte. De plus, l'exploitation de cette théorie permet à la fois de traduire les valeurs linguistiques utilisées par les experts pour les caractériser, d'exprimer la gradualité des phénomènes que l'on cherche à appréhender et la traduire dans les valeurs de sorties et, enfin, de modéliser les imprécisions inhérentes aux paramètres observés et mesurés. Le recours à la théorie des sous-ensembles flous permet aussi d'intégrer dans le système un raisonnement humain. Ainsi l'utilisation de cette théorie conduit au développement d'un système plus souple, i.e., un système qui communique des situations intermédiaires plutôt qu'un mode de vigilance strict et unique. Le système flou permet en effet d'obtenir en sortie une valeur chiffrée d'appartenance à chacun des quatre modes de vigilance possibles : *Détendu*, *Méfiant*, *Alerté* et *Hasardeux*.

Notons qu'afin de conserver les quatre valeurs de sorties mentionnées ci-avant, nous décidons de ne pas exploiter la dernière étape d'un système flou, i.e., l'étape de défuzzification (pour mémoire, voir Annexe B). Cela évite l'obtention finale d'une valeur unique qui peut induire une fausse impression de précision chez l'utilisateur. Conserver une valeur sur chacun des quatre modes de vigilance permet de donner à l'utilisateur une meilleure vue d'ensemble du résultat et donc une meilleure conscience de la situation. Cela permet ensuite de mieux le conseiller, grâce à la démarche CRISTAL, sur les comportements qu'il est possible d'adopter et les mesures qu'il peut décider de mettre en œuvre. Si nous supposons que le mode de vigilance *Détendu* correspond à un niveau de risque 0 et le mode de vigilance *Hasardeux* à un niveau de risque 12, quel serait en effet le sens, pour un utilisateur, d'une valeur de sortie chiffrée à 4,8 sur 12, le mettant en difficulté pour conduire les phases d'analyse et de décision de CRISTAL ? À l'inverse, savoir qu'il se situe en partie dans les modes *Méfiant* et *Alerté* lui permet de conduire ces phases puis de prendre sa propre décision pour mettre en œuvre des mesures adaptées et ainsi mieux gérer une situation qu'il sait intermédiaire.

Comme évoqué précédemment, selon le mode de vigilance obtenu par le système en phase de détection, la démarche CRISTAL conseille l'utilisateur, en phase de décision, sur le comportement à adopter : éviter le danger, réduire le risque ou encore changer d'itinéraire voire de projet. L'exemple pratique ci-dessous décrit les étapes d'analyse et de décision de la démarche CRISTAL afin d'illustrer ces propos et de souligner l'intérêt d'un système flou. Le lecteur peut s'appuyer sur la Figure 4.7 afin de suivre le processus lié à cet exemple.

Si le système global donne le mode de vigilance *Méfiant* comme valeur de sortie sur la base des paramètres liés au terrain et aux conditions nivo-météorologiques, alors la phase d'analyse de la démarche demande à l'utilisateur d'évaluer s'il est en mesure d'éviter le danger ou non. Si oui, en évitant le danger, il reste dans le mode de vigilance *Méfiant* (voir Figure 4.7a). Dans ce cas, une avalanche est seulement possible à proximité de son itinéraire, mais ne devrait pas intersecter ce dernier. Sinon, s'il ne peut pas ou ne veut pas éviter le danger, l'utilisateur doit estimer s'il est en mesure de prendre des mesures de réduction du risque. Quelle que soit sa réponse, son état d'esprit doit changer et il entrera a minima dans le mode de vigilance *Alerté*. S'il prend des mesures de réduction du risque, en effet, il sera dans le mode de vigilance *Alerté* (voir Figure 4.7b), sinon, il basculera directement dans le mode de vigilance *Hasardeux* (voir Figure 4.7c) et devra faire évoluer son projet puisque des signes clairement identifiés indiquent qu'une avalanche est possible sur l'itinéraire qu'il a planifié et qu'il ne sera en mesure ni de l'éviter ni de réduire les conséquences du risque encouru.

Pour compléter cela, en précisant l'exemple, nous pouvons présenter l'un des bénéfiques d'un système exploitant la théorie des sous-ensembles flous. Rappelons d'abord qu'en mode *Méfiant* le skieur cherche à éviter le danger et qu'en mode *Alerté* il cherche à réduire le risque. Grâce aux différents degrés d'appartenance obtenus en sortie du système flou pour chacun des quatre modes de vigilance possibles, par exemple 0,8 / *Méfiant* et 0,2 / *Alerté* le skieur sera davantage sur ses gardes qu'un skieur seulement dans le mode *Méfiant*. Si le skieur cherche principalement à éviter le danger (étant majoritairement en mode *Méfiant*), il pourra prendre des précautions supplémentaires, évitant ainsi tout effet de surprise. Il pourra donc commencer à prendre des mesures de réduction du risque, comme par exemple mettre une distance de sécurité entre toutes les personnes du groupe.

Enfin, le fait d'obtenir les degrés d'appartenance à plusieurs modes de vigilance distincts permet d'offrir à l'utilisateur des marges de manœuvre. L'automatisation de l'évaluation de certains critères (tels que le sous-critère C2.4 *Peut atteindre le skieur* du critère C2 *Inclinaison des pentes* ou le paramètre C3.x<sub>1</sub> *Localisation* du critère C3 *Observations d'avalanches récentes* comme on a pu le voir au Chapitre 3), s'ils ne sont pas réévalués humainement, réduit la flexibilité disponible dans la méthode pour l'utilisateur. En revanche, le système flou, donnant des degrés d'appartenance à chacun des quatre sous-ensembles flous correspondant aux quatre modes de vigilance, laisse à l'utilisateur final une marge d'interprétation et un choix final sur la décision.

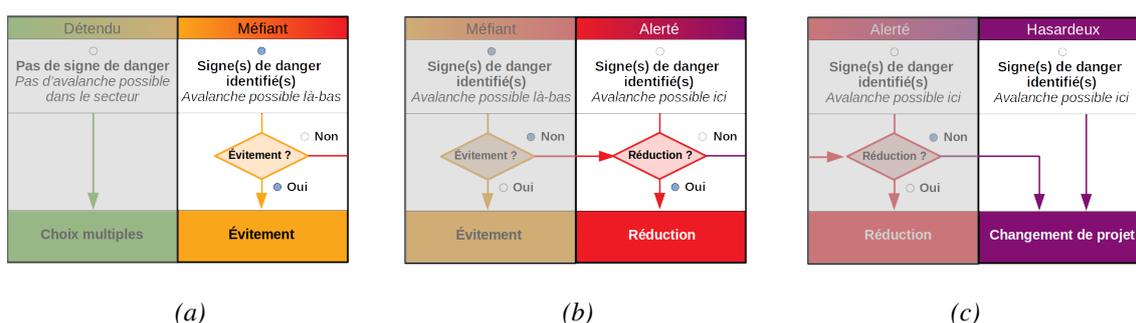


Figure 4.7 – Étape de la prise de décision : choix possibles (évitement, réduction, changement de projet), cohérents avec l'analyse

Par ailleurs, s'il le juge nécessaire suite à l'étape d'explication du résultat, l'utilisateur est aussi en capacité de réitérer le processus afin de réévaluer les critères les plus prépondérants. Dans le cadre du système flou, qui donne sur chacun des cinq critères (C2 à C6) les degrés d'appartenance à chacun des sous-ensembles flous possibles, l'utilisateur, lors de sa réévaluation d'un ou plusieurs critères, peut alors choisir de trancher en faveur de l'un ou l'autre des sous-ensembles. De cette manière, il pourra choisir des valeurs qui lui semblent plus appropriées au vu de sa propre analyse (comparée à l'automatisation de l'évaluation des différents critères). Il pourra alors jouer en faveur

soit d'une augmentation du mode de vigilance obtenu (décalage vers le mode *Hasardeux*), soit, au contraire, d'une minimisation de la valeur de sortie (décalage vers le mode *Détendu*). Cela revient à dire qu'il pourra soit adopter un comportement plus prudent, soit se donner plus de liberté de pratique (en fonction de son goût ou de son aversion pour le risque, ou encore selon le contexte humain, lié à son engagement personnel ou à ses responsabilités).

Prenons un exemple pour expliciter ce principe. Le critère C2 a trois valeurs de sorties graduelles possibles : *Situation sûre*, *Situation incertaine* et *Situation dangereuse*. Dans cet exemple, la première itération du système attribue respectivement à chacun des trois sous-ensembles flous les degrés d'appartenance suivants : 0,4; 0,6 et 0. Dans ce cas, si l'utilisateur n'a que peu confiance dans les règles adoptées par le système, il peut, lors de la seconde itération, trancher en faveur de l'un ou l'autre des sous-ensembles *Situation sûre* ou *Situation incertaine*. Concrètement, l'utilisateur final, en symbolique et dans l'univers de son discours métier, peut affirmer être dans la *Situation sûre* ou dans la *Situation incertaine*. Il se positionne donc en faveur de l'un ou l'autre des sous-ensembles flous, ce qui a pour conséquence directe dans le système de règles d'attribuer la valeur de 1 au sous-ensemble choisi. Ainsi, selon son analyse, il pourra choisir d'être plus prudent, en optant pour le sous-ensemble flou *Situation incertaine*, ce qui aura pour conséquence de fixer la valeur de 1 comme degré d'appartenance au second sous-ensemble flou, soit *Situation incertaine*. À l'inverse, s'il estime que l'évaluation automatique donnée par le système est trop pessimiste et que la réalité est plus favorable que l'estimation, il pourra affirmer être dans une *Situation sûre*, ce qui aura pour conséquence d'attribuer un degré d'appartenance de 1 au sous-ensemble flou *Situation sûre*. Cependant, pour la seconde itération, l'utilisateur reste borné par les valeurs communiquées par le système et ne peut donc pas choisir d'attribuer au critère C2 la valeur *Situation dangereuse* (puisque celle-ci a reçu un degré d'appartenance nul à la première itération). Ainsi, faire reposer la méthode sur deux itérations successives permet à l'utilisateur de s'investir tout en restant cadré par les résultats de la première estimation de la méthode. Cela donne donc de la flexibilité au système, sans pour autant le rendre totalement subjectif. Si dans un premier temps la méthode estime automatiquement les valeurs qui sont aujourd'hui automatisables, l'utilisateur peut toutefois intervenir dans un second temps et prendre part au processus en tranchant entre plusieurs suggestions possibles initialement dégagées par la méthode (i.e., entre plusieurs sous-ensembles flous pour lesquels des degrés d'appartenance non nuls ont été obtenus). L'utilisateur est donc en mesure de corriger et préciser l'évaluation et *in fine* le mode de vigilance détecté. Le fait de pouvoir mettre en œuvre plusieurs itérations du système pour affiner les évaluations offre une marge de manœuvre pour un utilisateur expert.

Enfin, l'utilisateur doit comparer le mode de vigilance évalué à la sortie de notre système de fusion à la valeur chiffrée donnée par le BERA. Si l'indice de risque du bulletin a en effet été laissé de côté pour l'évaluation, il s'agit tout de même de le considérer, a minima pour une mise en confrontation, ce dernier étant un produit public de référence. Selon cette comparaison et son avis, l'utilisateur pourra alors, s'il le juge nécessaire, procéder à la seconde itération du système, afin d'affiner et de réévaluer certaines valeurs. Par nature, le résultat donné par le système développé est local (voir Section 4.1.1). Il est en effet lié à l'évaluation du risque potentiel maximum que l'on peut identifier localement. Le BERA donne quant à lui une information d'ordre régional, liée à un risque moyen à l'échelle d'un massif. Cependant, le bulletin peut tout de même assister l'utilisateur dans sa réévaluation des paramètres exploités par la méthode grâce à la lecture des informations textuelles qu'il contient, informations dont le rôle essentiel a été démontré dans la littérature (voir Section 1.1.5). L'utilisateur pourra notamment tester l'impact de la modification des valeurs prises par les paramètres exploités dans les règles et ayant joué un rôle dominant afin d'identifier les effets induits sur le résultat, et donc sur le mode de vigilance obtenu en sortie. S'il reste le même, l'utilisateur pourra lui attribuer une plus grande confiance; s'il évolue, il pourra décider d'adopter le mode de vigilance le plus prudent ou, au contraire, le moins contraignant, tout en étant averti et en mesure d'éviter un effet de surprise.

Pour résumer, avoir recours à un système exploitant la théorie des sous-ensembles flous permet

en particulier :

- la traduction des variables expertes linguistiques (voir Chapitre 2) ;
- la prise en compte (en entrée) de la gradualité des processus étudiés : une valeur n'est plus systématiquement nette et tranchée, mais peut appartenir à plusieurs sous-ensembles ;
- de donner (en sortie) des situations plus nuancées, intermédiaires, permettant une meilleure gestion du risque sur le terrain et une réduction de l'effet de surprise et laisser à l'utilisateur le choix final du comportement le plus adapté à adopter.

### Exemple concret et détaillé

Cet exemple fait appel aux règles de combinaison développées dans la suite de ce chapitre et détaillées dans l'Annexe D.

Pour rappel, nous travaillons dans le cadre symbolique flou et nous utilisons pour le traitement des règles les opérateurs PROD (produit) pour l'intersection ET et BSUM (somme bornée<sup>1</sup>) pour l'union OU impliquée dans l'inférence d'une règle ou dans la combinaison de plusieurs règles (voir Annexe B).

Pour cet exemple (voir Figure 4.8) nous nous plaçons dans le cadre d'une sortie en ski de randonnée voire ski hors piste, au départ du sommet du *Télesiège des 3000* (en Haute-Maurienne, dans la station de Bonneval-sur-Arc) pour rejoindre le Col de la Fourche (Crête d'Andagne). Le groupe de skieur, pour son itinéraire, fait le choix de passer en contrebas du replat à proximité du point coté 2743 m, afin de contourner les pentes. L'analyse sera alors conduite, dans cet exemple, au niveau du point P (voir carte de droite Figure 4.8), non loin du point coté 2743. La course est envisagée le 19 mars 2022 et l'analyse des modes de vigilance est réalisée la veille dans le cadre de la préparation de course, à la maison (le 18 mars 2022).

Dans cet exemple, l'analyse du critère *C2 Inclinaison des pentes* est conduite de bout en bout (i.e., des paramètres au critère). Les autres critères, dont les règles de combinaison n'ont pas fait l'objet de développement dans ces travaux, se verront directement attribuer les valeurs à leurs différents sous-ensembles flous.

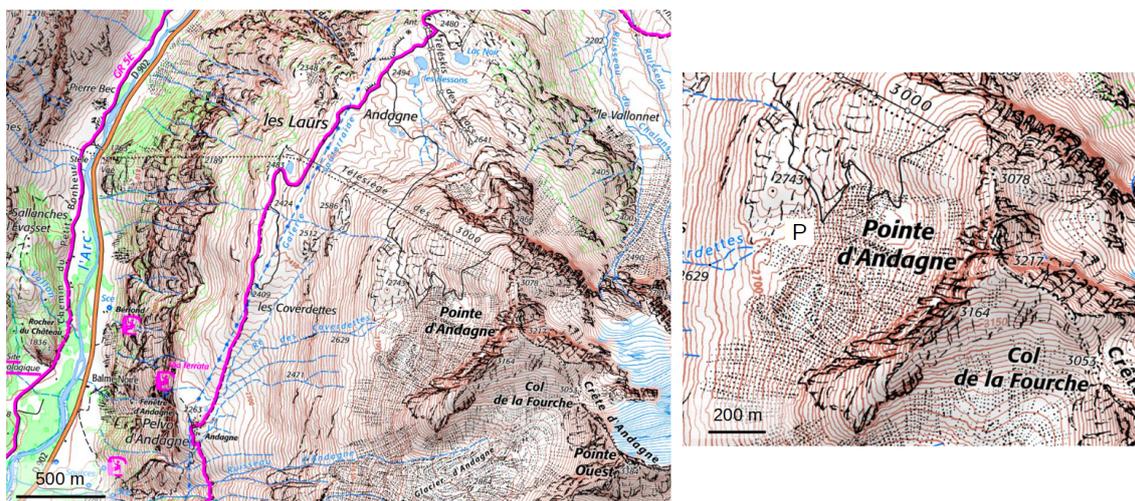


Figure 4.8 – Localisation de la zone d'étude (Source : Géoportail)

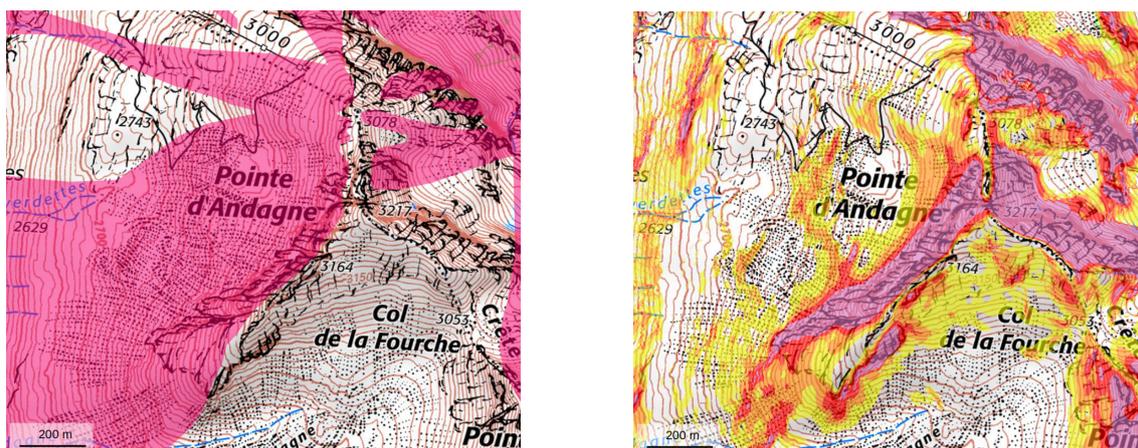
#### Critère C2 Inclinaison des pentes

##### Contexte :

Le groupe de skieurs se trouve au sud-est du point coté 2743 m (voir point P, carte de droite Figure

1.  $BSUM(A; B) = \min(A + B; 1)$

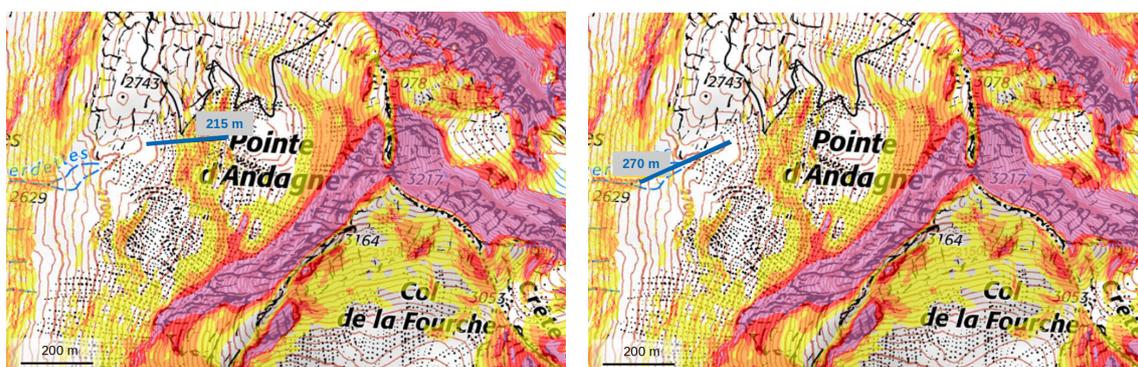
4.8), dans une zone couverte par la CLPA et au sein d'une enveloppe CLPA (voir Figure 4.9a). La pente dans laquelle ils se trouvent ne permet pas un départ d'avalanche (pente d'inclinaison inférieure à  $30^\circ$ ), cependant, ils sont dominés par des pentes avalancheuses (voir Figure 4.9b). Les pentes amont, avalancheuses, présentent un dénivelé de pentes d'inclinaison supérieure à  $30^\circ$  de 95 m (d'après la lecture de la carte : voir les pentes colorées en jaune, orange et rouge, Figure 4.9b; altitude du point bas des pentes colorées en amont des skieurs 2735 m et altitude du point haut des pentes colorées en amont des skieurs 2845 m). Les skieurs se trouvent à une distance plane horizontale de 215 m du sommet des pentes avalancheuses en amont (voir Figure 4.10a). Les pentes avalancheuses en aval se trouvent à environ 270 m de distance du groupe de skieurs (voir Figure 4.10b).



(a) Carte de localisation des phénomènes d'avalanche

(b) Carte des pentes

Figure 4.9 – Localisation de la zone d'étude, contexte relatif au critère C2 Inclinaison des pentes (Source : Géoportail)



(a) Distance plane horizontale aux sommet de la pente avalancheuse en amont

(b) Distance à la pente avalancheuse en aval

Figure 4.10 – Distance aux pentes avalancheuses (Source : Géoportail)

#### Sous-critère C2.1 CLPA :

Puisque les skieurs se trouvent dans une enveloppe CLPA, ce sous-critère prend la valeur 1 au sous-ensemble flou *Oui* et 0 au sous-ensemble flou *Non* (notés : 1 / *Oui* et 0 / *Non*).

#### Sous-critère C2.2 Pentés fréquentées :

Puisque les skieurs se trouvent dans une zone d'inclinaison inférieure à  $30^\circ$ , ce sous-critère prend la valeur de 1 au sous-ensemble flou *Pentes non-avalancheuses* et 0 au sous-ensemble flou *Pentes avalancheuses* (notés : 1 / *Non-avalancheuses* et 0 / *Avalancheuses*).

Sous-critère C2.3 *Pentes en amont* :

Puisque les skieurs se trouvent dans une zone dominée par des pentes d'inclinaison comprises entre 30° et 45° (couleurs jaune, orange et rouge sur la carte), ce sous-critère prend la valeur de 0 au sous-ensemble flou *Pentes non-avalancheuses* et 1 au sous-ensemble flou *Pentes avalancheuses* (notés : 0 / *Non-avalancheuses* et 1 / *Avalancheuses*). Le sous-critère C2.4 devra alors être interrogé.

Sous-critère C2.4 *Peut atteindre le skieur* :

Ce sous-critère fait appel à deux paramètres :

- C2.4<sub>1</sub> *Dénivelé de pentes > 30°*, qui prend ici la valeur 95 m (voir contexte ci-dessus);
- C2.4<sub>2</sub> *Distance horizontale*, qui prend ici la valeur 215 m (voir contexte ci-dessus).

Le niveau d'agrégation *n-2*, dans le cas du sous-critère C2.4 *Peut atteindre le skieur*, est issu de statistiques (voir Chapitre 3). Le sous-critère C2.4 prend alors les valeurs suivantes (Figure 4.11) :

- 0,62 pour le sous-ensemble flou *Oui (position dangereuse)* (noté : 0,62 / *Oui Dangereuse*);
- 0,38 pour le sous-ensemble flou *Position intermédiaire* (noté : 0,38 / *Intermediaire*)
- 0 pour le sous-ensemble flou *Non (position sûre)* (noté : 0 / *Non Sure*).

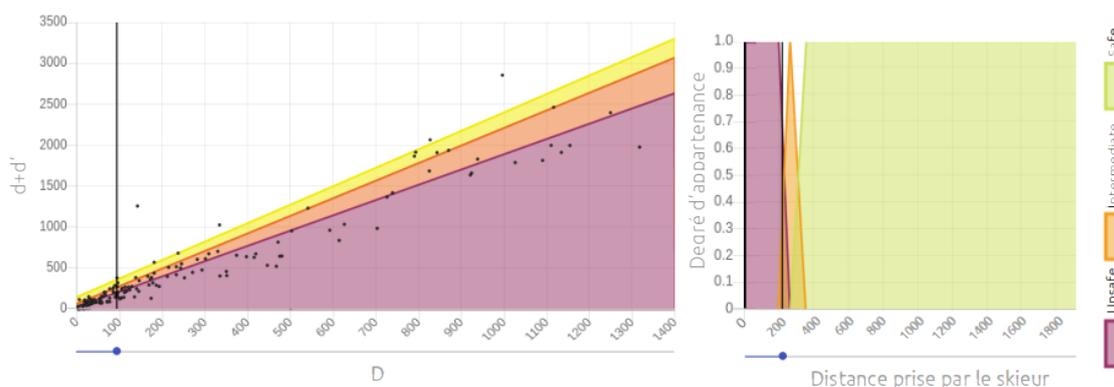


Figure 4.11 – Distance d'arrêt des avalanches

Sous-critère C2.5 *Pentes en aval* :

Les skieurs, même s'ils sont éloignés, dominent des pentes d'inclinaison comprises entre 30° et 45° (couleurs jaune, orange et rouge sur la carte). Ce sous-critère prend alors la valeur 0 au sous-ensemble flou *Pentes non-avalancheuses* et 1 au sous-ensemble flou *Pentes avalancheuses* (notés : 0 / *Non-avalancheuses* et 1 / *Avalancheuses*). Le sous-critère C2.6 devra alors être interrogé.

Sous-critère C2.6 *Peut emporter le skieur* :

Ce sous-critère fait appel à deux paramètres :

- C2.6<sub>1</sub> *Distance*, qui prend ici la valeur 270 m (voir contexte ci-dessus);
- C2.6<sub>2</sub> *Inclinaison*.

Le niveau d'agrégation *n-2*, dans le cas du sous-critère C2.6 *Peut atteindre le skieur* (présenté au Chapitre 2) montre que, quelle que soit la valeur prise par le paramètre C2.6<sub>2</sub> *Inclinaison*, si la valeur du paramètre C2.6<sub>1</sub> *Distance* est supérieure ou égale à 30 m, alors la valeur attribuée à C2.6 *Peut emporter le skieur* est de 0 pour le sous-ensemble flou *Oui (position dangereuse)*, 0 pour le sous-ensemble flou *Position intermédiaire* et 1 pour le sous-ensemble flou *Non (position sûre)* (notés : 0 / *Oui Dangereuse*, 0 / *Intermediaire* et 1 / *Non Sure*).

C2.7 *Surface mobilisable* :

Ce sous critère n'a pas fait l'objet de développement dans nos travaux, en tant qu'utilisateur nous décidons de lui attribuer, au vu de la carte, les valeurs de 0,4 pour le sous-ensemble flou *Faible* et 0,6 pour le sous-ensemble flou *Grande* (notés : 0,4 / *Faible* et 0,6 / *Grande*).

Combinaison de niveau  $n-1$  conduisant au critère C2 *Inclinaison des pentes* :

Au vu des valeurs prises par les différents sous-critères, les règles 2-14, 2-17, 2-20 et 2-23 (voir Annexe D.2.1) sont actives. Par application de l'inférence<sup>2</sup> et des règles de calcul vues en Annexe B.1.2, avec, pour rappel,  $\perp$  la somme bornée et  $T_1$  et  $T_2$  le produit, nous avons :

— du fait de la règle 2-14 :

Rappel de la règle 2-14 :

**IF** C2.2\_Pentes\_Frequentees **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**

((C2.3\_Pentes\_Amont **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.4\_Peut\_Atteindre\_Skieur **IS** Oui\_Position\_Dangereuse)  
**OR**

(C2.5\_Pentes\_Aval **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Oui\_Position\_Dangereuse)) **AND**

C2.7\_Surface\_Mobilisable **IS** Faible

**THEN** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine

$T_2$  ( 1 / *Non-avalancheuses* ;

$\perp$  (  $T_2$  ( 1 / *Avalancheuses* ; 0,62 / *Oui Dangereuse* ) ;  $T_2$  ( 1 / *Avalancheuses* ; 0 / *Oui Dangereuse* ) ) ;  
0,4 / *Faible* )

=  $T_2$  ( 1 ;  $\perp$  ( 0,62 ; 0 ) ; 0,4 )

=  $T_2$  ( 1 ; 0,62 ; 0,4 )

= 0,248

$\alpha = 1$

$T_1$  ( 0,248 ;  $\alpha$  ) =  $T_1$  ( 0,248 ; 1 ) = 0,248

Soit 0,248 / *Situation incertaine*.

— du fait de la règle 2-17 :

Rappel de la règle 2-17 :

**IF** C2.1\_CLPA **IS** Oui **AND**

C2.2\_Pentes\_Frequentees **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**

C2.3\_Pentes\_Amont **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**

C2.4\_Peut\_Atteindre\_Skieur **IS** Position\_Intermediaire **AND**

C2.5\_Pentes\_Aval **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**

C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Non\_Position\_Sure **AND**

C2.7\_Surface\_Mobilisable **IS** Faible

**THEN** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine

$T_2$  ( 1 / *Oui* ;

1 / *Non-avalancheuses* ;

1 / *Avalancheuses* ;

0,38 / *Intermediaire* ;

1 / *Avalancheuses* ;

1 / *Non Sure* ;

2. Pour application de la règle compositionnelle d'inférence de Zadeh, nous avons pour une entrée  $(x_0, y_0)$  :

$$\mu(C_k) = \perp_{A_i \in L_X, B_j \in L_Y} T_1(T_2(\mu_{A_i}(x_0), \mu_{B_j}(y_0)), \alpha_{ijk}),$$

avec  $T_1, T_2$  des t-normes et  $\perp$  une t-conorme,

et

$$\alpha_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{s'il existe une règle liant } A_i, B_j \text{ et } C_k, \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases}$$

où  $\alpha$  représente le degré de validité de la règle (dans notre cas 100% ou 0%).

$0,4 / Faible$  )  
 $= 0,152$   
 $\alpha = 1$   
 $T_1(0,152; \alpha) = T_1(0,152; 1) = 0,152$   
 Soit  $0,152 / Situation\ incertaine$ .

— du fait de la règle 2-20 :

Rappel de la règle 2-20 :

**IF** C2.2\_Pentes\_Frequentees **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
  
 ((C2.3\_Pentes\_Amont **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
 C2.4\_Peut\_Atteindre\_Skieur **IS** Oui\_Position\_Dangereuse)  
**OR**  
 (C2.5\_Pentes\_Aval **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
 C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Oui\_Position\_Dangereuse)) **AND**  
  
 C2.7\_Surface\_Mobilisable **IS** Grande  
**THEN** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Dangereuse

$T_2(1 / Non-avalancheuses ;$   
 $\perp (T_2(1 / Avalancheuses ; 0,62 / Oui\ Dangereuse) ; T_2(1 / Avalancheuses ; 0 / Oui\ Dangereuse)) ;$   
 $0,6 / Grande)$   
 $= T_2(1 ; \perp(0,62 ; 0) ; 0,6)$   
 $= T_2(1 ; 0,62 ; 0,6)$   
 $= 0,372$   
 $\alpha = 1$   
 $T_1(0,372; \alpha) = T_1(0,372; 1) = 0,372$   
 Soit  $0,372 / Situation\ dangereuse$ .

— du fait de la règle 2-23 :

Rappel de la règle 2-23 :

**IF** C2.1\_CLPA **IS** Oui **AND**  
 C2.2\_Pentes\_Frequentees **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
 C2.3\_Pentes\_Amont **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
 C2.4\_Peut\_Atteindre\_Skieur **IS** Position\_Intermediaire **AND**  
 C2.5\_Pentes\_Aval **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
 C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Non\_Position\_Sure **AND**  
 C2.7\_Surface\_Mobilisable **IS** Grande  
**THEN** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Dangereuse

$T_2(1 / Oui ;$   
 $1 / Non-avalancheuses ;$   
 $1 / Avalancheuses ;$   
 $0,38 / Intermediaire ;$   
 $1 / Avalancheuses ;$   
 $1 / Non\ Sure ;$   
 $0,6 / Grande)$   
 $= 0,228$   
 $\alpha = 1$   
 $T_1(0,228; \alpha) = T_1(0,228; 1) = 0,228$   
 Soit  $0,228 / Situation\ dangereuse$ .

Pour *Situation incertaine*, nous avons donc :

$\mu(Situation\ incertaine) = \perp(0,248; 0,152) = \min(0,248 + 0,152; 1) = \min(0,4; 1) = 0,4$ .  
 Soit **0,4 / Situation incertaine**.

Pour *Situation dangereuse*, nous avons donc :

$$\mu(\text{Situation dangereuse}) = \perp (0,372 ; 0,228) = \min(0,372 + 0,228 ; 1) = \min(0,6 ; 1) = 0,6.$$

Soit **0,6 / Situation dangereuse**.

### Critère C3 Observations d'avalanches récentes

Contexte :

Une avalanche récente a eu lieu le 15 mars (<http://www.data-avalanche.org/avalanche/1647598693212>) dans le même secteur et dans des pentes d'orientations et altitudes similaires (voir Figure 4.12). Cette avalanche récente est donc très critique, cependant, puisqu'elle a eu lieu près de quatre jours avant la sortie envisagée (pour rappel sortie prévue en date du 19 mars) sa criticité peut être légèrement revue à la baisse. Nous attribuons donc la valeur 0 au sous-ensemble flou *Non critique*, 0 au sous-ensemble flou *Peu critique*, 0,2 au sous-ensemble flou *Moyennement critique* et 0,8 au sous-ensemble flou *Très critique* (notés : 0 / *Non critique*, 0 / *Peu critique*, 0,2 / *Moyennement critique* et 0,8 / *Tres critique*).

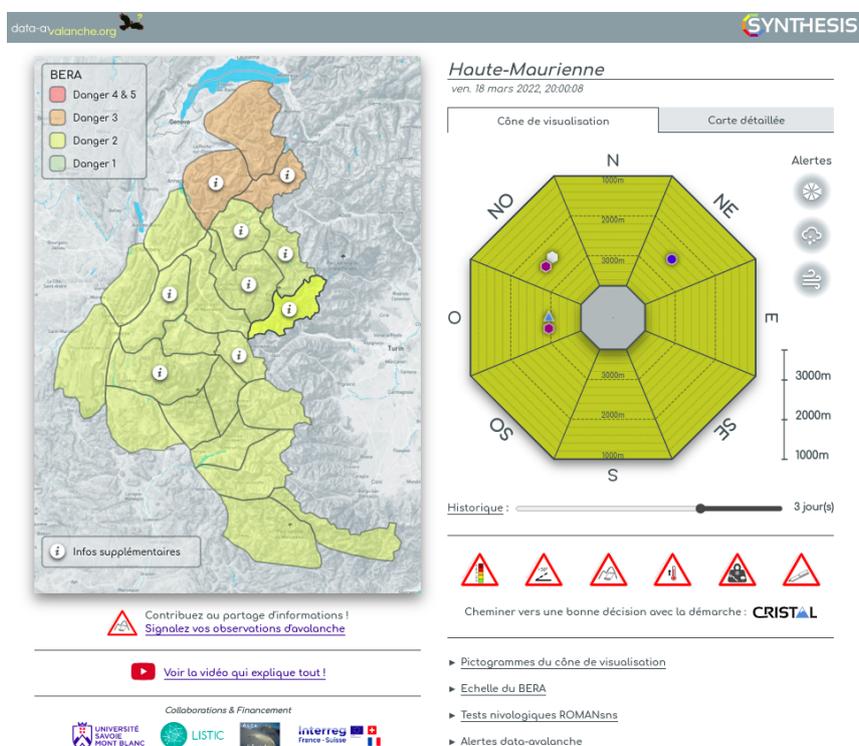


Figure 4.12 – Données relatives aux observations d'avalanches récentes (triangles bleus) et tests nivologiques (symbole hexagonal de couleur)(Source : [https://projects.listic.univ-smb.fr/cime/syntheseis/2022\\_03\\_18/haute\\_maurienne](https://projects.listic.univ-smb.fr/cime/syntheseis/2022_03_18/haute_maurienne))

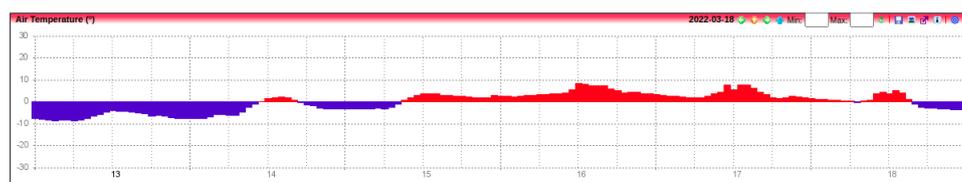


Figure 4.13 – Données relatives à la température de l'air, enregistrées par la station FlowCapt de Bonneval-sur-Arc (Source : [http://www.iav-portal.com/index.php?nav=datameteo\\_station\\_period&lang=fr&code=FBON1&ced=2022-3-18&cpl=6](http://www.iav-portal.com/index.php?nav=datameteo_station_period&lang=fr&code=FBON1&ced=2022-3-18&cpl=6))

**Critère C4 Augmentation de température, fonte**

Contexte :

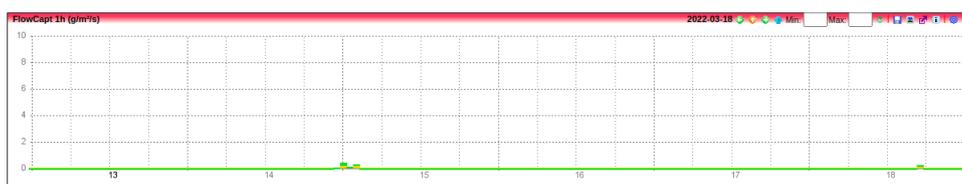
La station de mesure FlowCapt installée à proximité (Bonneval-sur-Arc) montre un fort réchauffement (voir Figure 4.13). Nous attribuons donc la valeur 0 au sous-ensemble flou *Nulle*, 0 au sous-ensemble flou *Moyenne* et 1 au sous-ensemble flou *Forte* (notés : 0 / *Nulle*, 0 / *Moyenne* et 1 / *Forte*).

**Critère C5 Surcharges nouvelles**

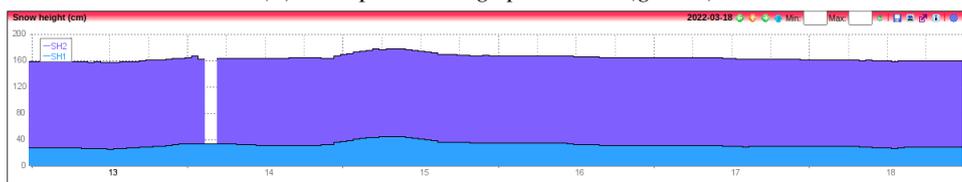
Contexte :

la station FlowCapt indique l'absence de surcharge nouvelle : ni transport de neige par le vent (Figure 4.14a), ni précipitations récentes que ce soit sous forme de neige (Figure 4.14b) ou de pluie (Figure 4.14c).

Ainsi, nous attribuons la valeur de 1 au sous-ensemble flou *Nulle* et 0 aux autres sous-ensembles flous (notés : 1 / *Nulle*, 0 / *Moyenne* et 0 / *Forte*).



(a) Transport de neige par le vent ( $g/m^2/s$ )



(b) Hauteur du manteau neigeux (cm)



(c) Intensité de la pluie (mm/h)

Figure 4.14 – Données relatives aux surcharges nouvelles (précipitations et transport de neige par le vent), enregistrées par la station FlowCapt de Bonneval-sur-Arc (Source : [http://www.iaav-portal.com/index.php?nav=datameteostation\\_period&lang=fr&code=FBON1&ced=2022-3-18&pl=6](http://www.iaav-portal.com/index.php?nav=datameteostation_period&lang=fr&code=FBON1&ced=2022-3-18&pl=6))

**Critère C6 Couche fragile enfouie :**

Contexte :

Rappelons tout d'abord qu'une avalanche récente a été observée ; le sous-critère C6.1 *Présence* prend donc la valeur *Présence*. Ensuite, le sous-critère C6.2 *Efficacité* est analysé par l'intermédiaire des trois paramètres C6.2.1 *Types d'avalanches locales observées*, C6.2.2 *Propagation (mesure)* et C6.2.3 *Propagation (caractérisation)*. Comme nous l'avons vu au Chapitre 2, puisque C6.2.1 *Types d'avalanches locales observées* prend la valeur *Avalanche de plaque* alors C6.2 *Efficacité* devrait se voir attribuer la valeur *Fortement efficace*. Dans notre situation, un test nivologique a été réalisé (voir Figure 4.12) ; étudions alors son résultat et la valeur à laquelle il conduirait pour le sous-critère C6.2 *Efficacité*. Lors de ce test, la mesure de la propagation est forte puisque seule une fraction  $\varepsilon$  du bloc a du être sciée (i.e., moins d'un quart) pour générer le propagation (voir Figure 4.15). Cette propagation a ensuite été caractérisée de *propagation incomplète avec reprise* (voir Figure 4.15). Ainsi, C6.2.2 *Propagation (mesure)* se voit attribuer la valeur *Forte* et C6.2.3

*Propagation (caractérisation)* se voit attribuer la valeur *Avec reprise*, ce qui donnerait, d'après la combinaison établie au Chapitre 2 la valeur *Moyennement efficace* au sous-critère C6.2 *Efficacité*. Ainsi, au vu de ces deux résultats légèrement différents (*Moyennement efficace* vs *Fortement efficace*) pour le sous-critère C6.2 et puisque les règles de combinaisons permettant le passage de l'ensemble de ces paramètres au critère C6 n'ont pas été entièrement définies et que ce dernier n'a pas fait l'objet d'une description floue dans ces travaux, nous décidons, en tant qu'utilisateur, d'attribuer la valeur 0,6 au sous-ensemble flou *Moyennement efficace* et 0,4 au sous-ensemble flou *Tres efficace* (notés : 0,6 / *Moyennement efficace* et 0,4 / *Tres efficace*).

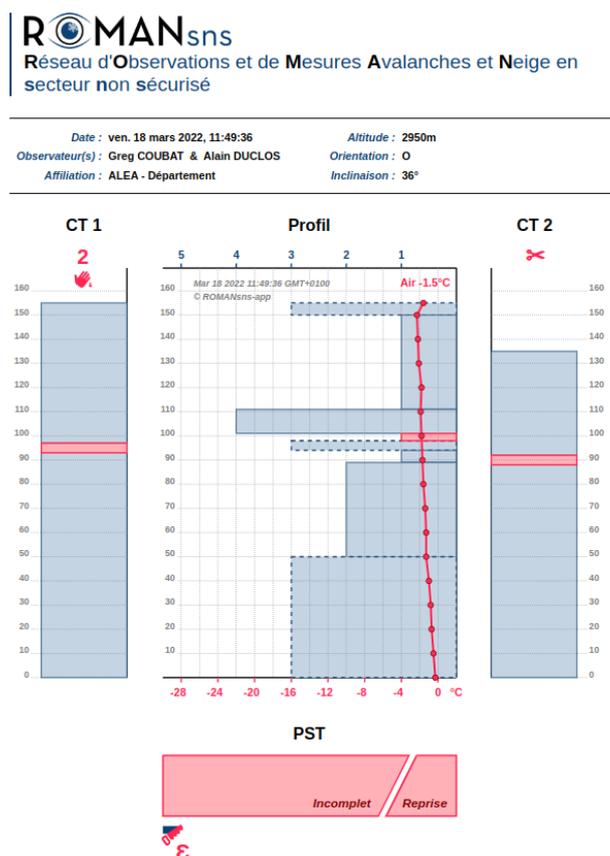


Figure 4.15 – Résultat du test nivologique réalisé le 18 mars 2022 à proximité du Télésiège des 3000 (Source : <http://www.data-avalanche.org/romansns-test/1647600576391>)

**Combinaison de niveau  $n$  conduisant aux modes de vigilance** Au vu des valeurs prises par les différents critères, les règles 9, 28 et 29 (voir Annexe D.1) sont exploitées. Nous avons, par application des règles de calcul vues en Annexe B.1.2, avec pour rappel  $\perp$  la somme bornée et  $T_1$  et  $T_2$  le produit :

— du fait de la règle 9 :

Rappel de la règle 9 :

IF (C2\_Inclinaison\_Pentes IS Situation\_Incertaine AND

(C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte IS Forte OR

C5\_Surcharges\_Nouvelles IS Forte OR

C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie IS Tres\_Efficace)

THEN Mode\_Vigilance IS Detendu

$T_2 (0,4 / \textit{Situation incertaine} ;$   
 $\perp (1 / \textit{Forte} ; 0 / \textit{Forte} ; 0,4 / \textit{Tres efficace} )$

$= T_2 (0,4 ; 1)$

$= 0,4$

$\alpha = 1$

$T_1 (0,4 ; \alpha) = T_1 (0,4 ; 1) = 0,4$

Soit **0,4 / Alerté**.

— du fait de la règle 28 :

Rappel de la règle 28 :

IF C2\_Inclinaison\_Pentes IS Situation\_Dangereuse AND  
 C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes IS Situation\_Tres\_Critique AND

((C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte IS Moyenne OR

C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte IS Forte)

OR

(C5\_Surcharges\_Nouvelles IS Moyenne OR

C5\_Surcharges\_Nouvelles IS Forte)

OR

(C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie IS Peu\_Efficace OR

C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie IS Moyennement\_Efficace OR

C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie IS Tres\_Efficace))

THEN Mode\_Vigilance IS Hasardeux

$T_2 (0,6 / \textit{Situation dangereuse} ;$

$0,8 / \textit{Situation Tres Critique} ;$

$\perp (\perp (0 / \textit{Moyenne} ; 1 / \textit{Forte} ) ;$

$(\perp (0 / \textit{Moyenne} ; 0 / \textit{Forte} ) ;$

$(\perp (0 / \textit{Peu efficace} ; 0,6 / \textit{Moyennement efficace} ; 0,4 / \textit{Tres efficace} ) ) ;$

$= T_2 (0,6 ; 0,8 ; \perp (1 ; 0 ; 1) )$

$= T_2 (0,6 ; 0,8 ; 1)$

$= 0,48$

$\alpha = 1$

$T_1 (0,48 ; \alpha) = T_1 (0,48 ; 1) = 0,48$

Soit **0,48 / Hasardeux**.

— du fait de la règle 29 :

Rappel de la règle 29 :

IF C2\_Inclinaison\_Pentes IS Situation\_Dangereuse AND

(C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes IS Situation\_Non\_Critique OR

C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes IS Situation\_Peu\_Critique OR

C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes IS Situation\_Moyennement\_Critique)

AND

(C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte IS Forte

OR

C5\_Surcharges\_Nouvelles IS Forte

OR

(C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie IS Moyennement\_Efficace OR

C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie IS Tres\_Efficace))

THEN Mode\_Vigilance IS Hasardeux

$$\begin{aligned}
& T_2 ( 0,6 / \textit{Situation dangereuse} ; \\
& \quad \perp ( 0 / \textit{Non critique} ; 0 / \textit{Peu critique} ; 0,2 / \textit{Moyennement critique} ) ; \\
& \quad \perp ( 1 / \textit{Forte} ; 0 / \textit{Forte} ; \perp ( 0,6 / \textit{Moyennement efficace} ; 0,4 / \textit{Tres efficace} ) ) ); \\
& = T_2 ( 0,6 ; 0,2 ; \perp ( 1 ; 0 ; 1 ) ) \\
& = T_2 ( 0,6 ; 0,2 ; 1 ) \\
& = 0,12 \\
& \alpha = 1 \\
& T_1 ( 0,12 ; \alpha ) = T_1 ( 0,12 ; 1 ) = 0,12 \\
& \text{Soit } \mathbf{0,12} / \textit{Hasardeux}.
\end{aligned}$$

Pour *Alerté*, nous avons donc :

$$\mu(\textit{Alerte}) = 0,4.$$

Soit au final **0,4** / *Alerté*.

Pour *Hasardeux*, nous avons donc :

$$\mu(\textit{Hasardeux}) = \perp ( 0,48 ; 0,12 ) = \min(0,48 + 0,12 ; 1) = \min(0,6 ; 1) = 0,6.$$

Soit au final **0,6** / *Hasardeux*.

#### Explications et analyse

Dans cet exemple, le groupe de skieurs est donc majoritairement en mode *Hasardeux*. Ceci vient notamment de la situation dangereuse (valeur de 0,6) qui caractérise les pentes associée aux valeurs critiques identifiées sur les autres critères (C3 à C6).

En mode *Hasardeux*, le groupe devrait renoncer à l'itinéraire envisagé. En mode *Alerté* (tout de même obtenu à hauteur de 0,4) le groupe devrait réduire les risques en prenant des mesures de gestion sur le terrain comme des distances entre les participants pour n'exposer qu'un seul membre à la fois.

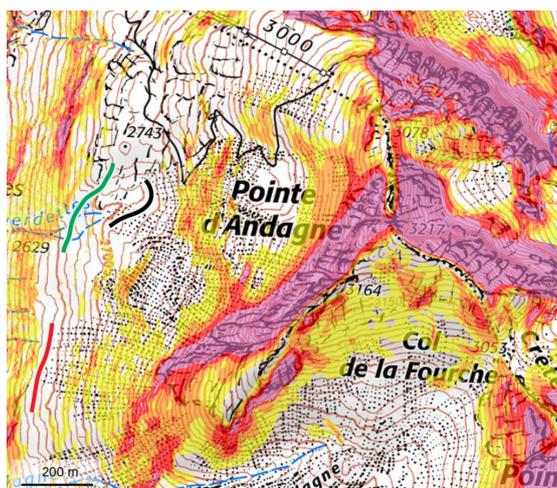
Au vu des résultats (mode de vigilance partiellement *Hasardeux* et partiellement *Alerté*) et puisque le groupe est encore en phase de préparation de la sortie, il ne va pas immédiatement renoncer à son projet. Il peut alors analyser la situation plus en détails. Une façon de réduire le mode *Hasardeux* serait de réduire l'aspect dangereux des pentes, le groupe peut alors envisager de s'éloigner davantage des pentes en amont qui dominent son itinéraire. Il peut envisager un itinéraire s'éloignant de plus de 400 m du point haut des pentes avalancheuses en amont ce qui rend la situation vis-à-vis des pentes plus sûre (voir Figure 4.11). Il doit veiller cependant à rester suffisamment éloigné des pentes en aval (pour rappel une distance supérieure à 30 m assure une situation sûre quelle que soit la pente sous les pieds du skieur). Ceci est envisageable sur le tronçon d'itinéraire vert (voir Figure 4.16). Le groupe en phase de préparation peut donc envisager d'adapter son itinéraire pour réduire la valeur obtenue pour le mode de vigilance *Hasardeux* et augmenter le mode *Alerté* pour cette section d'itinéraire et envisager de réaliser la course ou du moins se rendre sur le terrain et réévaluer plus précisément les critères une fois sur place.

Cependant, dans son analyse complète, le groupe de skieurs doit ensuite évaluer la suite de son itinéraire pour rejoindre le col, itinéraire qui se trouvera nécessairement plus proche des pentes avalancheuses en amont et/ou aval. Vu les valeurs critiques des critères C3 à C6, l'analyse du tronçon suivant, passant à proximité des pentes avalancheuses (voir tronçon en rouge sur la Figure 4.16) est susceptible de retourner un mode de vigilance *Hasardeux* nécessitant un renoncement.

#### 4.1.4 Méthode de conception du système de fusion

Le besoin principal à satisfaire pour le développement de notre système de fusion hiérarchique réside dans le transfert d'expertise, c'est-à-dire dans l'acquisition de la connaissance à intégrer dans le système. L'objectif est donc de transférer les connaissances expertes vers le système, de comprendre le schéma de pensée du raisonnement d'un expert du domaine et d'en intégrer les principaux mécanismes dans le système. Ainsi, nous l'avons construit autour de nombreux temps d'échanges permettant l'interrogation d'Alain Duclos, l'expert en nivologie associé à notre projet.

Tout d'abord, la première étape consiste en l'élaboration d'un point de départ commun. Si la



Tronçon noir : tronçon initialement évalué (incluant le point P); tronçon vert : tronçon envisageable afin de réduire le mode de vigilance *Hasardeux* au profit du mode de vigilance *Alerté*; tronçon rouge : tronçon à venir susceptible de poser problème du fait de sa proximité aux pentes avalanches (mode de vigilance *Hasardeux*)

Figure 4.16 – Localisation de plusieurs tronçons de l'itinéraire pour le projet envisagé par le groupe de skieurs.

démarche CRISTAL, à l'origine, est basée sur six paramètres, nous préférons, pour les raisons scientifiques évoquées précédemment (voir Chapitre 2, Section 2.1), laisser de côté la prise en considération du niveau de danger du BERA. Considérant les arguments avancés, pour établir ce système développé sous un angle académique, nous établissons notre base commune autour des cinq critères principaux à prendre en compte. Pour rappel, le terme *paramètre* est celui employé dans la littérature propre à la démarche CRISTAL, dans le cadre des systèmes de fusion qui constituent notre contexte, nous parlons de *critères* pour désigner ces mêmes éléments.

De plus, à cela nous avons ajouté l'hypothèse d'indépendance des critères, afin d'éviter la prise en considération d'éléments redondants et pour s'abstraire d'un processus complexe (voir Préambule du Chapitre 2). En effet, si le phénomène d'avalanche est complexe, une approximation est nécessaire pour permettre une simplification du phénomène et le développement d'un tel système.

Ensuite, le travail exploratoire que nous avons réalisé conjointement avec Alain Duclos s'est articulé autour de réflexions théoriques et concrètes.

D'une part, nous avons suivi des réflexions théoriques, i.e., basées sur l'expérience acquise par l'expert au cours de sa carrière et des années de pratique. Le but de ces réflexions est principalement d'acquérir une meilleure compréhension de ce qu'intègre l'expert dans son schéma de pensée lors de sa propre analyse, directement basée sur les cinq critères principaux. Cela permet, progressivement, de saisir ce que doivent prendre en compte chacun des éléments (sous-critères, paramètres, sous-paramètres) émergeant de ces critères principaux, et donc de dégager les valeurs de sorties qu'ils sont susceptibles de prendre (i.e., les différents sous-ensembles flous associés à chaque élément). Ceci permet de considérer les différentes situations connues de l'expert permettant de passer en revue tous les éléments utiles à l'évaluation de la situation et les transposer dans le système. Il s'agit finalement de traduire dans le système ce que l'expert utilise intuitivement dans son mode de raisonnement. En réalité, ces réflexions d'ordre théorique sont le plus souvent rattachées, pour l'expert, à des cas concrets constituant son expérience, mais sans support, pour nous, autre que son partage d'expérience.

D'autre part, nous avons suivi des réflexions concrètes, i.e., basées sur des situations précises. Nous avons donc analysé des cas d'avalanches voire d'accidents d'avalanches (issus de la base

de donnée de l'association data-avalanche), ainsi que des situations concrètes de terrain, analysées pour leurs caractéristiques générales sans qu'elles soient nécessairement associées à des cas d'avalanches. L'analyse des deux cas présentés en Figure 4.17 nous a par exemple permis d'étudier différentes caractéristiques relatives aux pentes et leurs effets (principalement sur la question de la taille des pentes et de l'ampleur des avalanches potentielles qu'elles pourraient générer).



(a) Arête des Cosmiques © Gregory Coubat



(b) Tête de Lauranoure © Alain Duclos

Figure 4.17 – Exemple de cas permettant de conduire une réflexion sur la taille de la pente et son effet dans le raisonnement de la démarche CRISTAL et en particulier en phase de détection

L'une des difficultés réside dans le fait de traiter et évaluer les critères de manière indépendante, i.e., de conserver l'hypothèse d'indépendance établie entre les critères, ces derniers étant pourtant combinés intuitivement dans le raisonnement expert et en interaction permanente dans la réalité (puisque l'avalanche relève de l'interaction complexe entre le terrain, le manteau neigeux et les conditions météorologiques [Schweizer2003]).

Analyser des cas précis, comme ceux présentés en Figure 4.17, permet de saisir l'ensemble des éléments pris en compte intuitivement par l'expert dans une situation donnée, les garder en mémoire, puis les intégrer individuellement et de façon cloisonnée sur chacun des critères correspondants dans le système expert. Leur mise en commun n'intervient que par la suite, lors de l'extraction des règles de combinaison des différents critères. Sur la photographie de gauche, Figure 4.17a, les pentes avalancheuses identifiées sont de petite ampleur, cependant un groupe de skieur immobile en aval de ces pentes peut être affecté par un déclenchement d'avalanche en amont. À l'inverse, du fait de la taille de ces pentes et de l'absence d'obstacle (comme une barre rocheuse), un bon skieur peut envisager de réussir à s'échapper rapidement de la pente avalancheuse et éviter ainsi les risques. Sur la photographie de la Figure 4.17b la pente est de très grande ampleur. Selon les conditions nivologiques, les skieurs peuvent donc envisager un déclenchement d'une avalanche de très grande ampleur sur l'ensemble de la face. À l'inverse, dans d'autres conditions, les micro-reliefs de la pente peuvent générer des ruptures de l'homogénéité de la pente et seules des avalanches de plus petites dimensions pourront avoir lieu, offrant aux skieurs un risque moindre et des possibilités d'abris potentiels. Ainsi, ces deux photographies permettent :

- de soulever des questions relatives à la taille de la pente et *in fine* celle de l'avalanche susceptible de s'y déclencher ;
- de faire émerger le lien complexe entre le critère lié au terrain et ceux relatifs aux conditions nivo-météorologiques, critères à considérer de façon cloisonnée dans les premiers niveaux du système de fusion, mais dont les liens émergeront à travers les règles de combinaison de niveau  $n$  ;
- de soulever des questions liées au facteur humain et au niveau du skieur ou du groupe, questions utiles en phase d'analyse et de prise de décision sur le terrain.

Cette méthode de questionnement de la connaissance experte a permis de cerner les éléments qui composent le système, présentés dans les résultats du Chapitre 2.

Suite à cela intervient la méthode d'extraction des règles de combinaison des différents éléments (en plusieurs itérations), jusqu'à conduire aux critères puis aux modes de vigilance. Cette méthode plus spécifique sera présentée en Section 4.2.1.

Ainsi, c'est à travers le recueil d'expertise, l'exploitation de situations concrètes et des mises en situations réelles que nous avons pu développer le système et établir une amélioration continue de ce dernier (voir Section 4.3.2).

## 4.2 Système de fusion : des éléments de base aux modes de vigilance

Par *élément de base*, nous faisons référence au premier niveau d'éléments combinés dans le système. Il s'agit donc des éléments les plus fins évoqués ci-dessus, i.e., les éléments correspondants, pour chaque critère, à la case la plus à droite des tableaux de synthèse 2.3 et 3.3 des Chapitres 2 et 3. Il s'agira ainsi de paramètres pour C2 et C6, ou encore, à ce stade, de sous-paramètres pour C3 (mais l'ajout d'un niveau supplémentaire à l'avenir n'est pas exclu).

Nous pourrions penser que le système doit s'établir dans un cadre spécifique, c'est-à-dire que les règles développées (présentées ci-après) doivent répondre à un contexte particulier. Cela signifie que les valeurs données en sortie des différentes combinaisons pourraient en effet différer pour des contextes différents. En réalité, tel n'est pas le cas puisque ces différences de contextes (par exemple "bons skieurs encadrés par un professionnel", ou "skieurs professionnels engagés", ou encore "groupe de skieurs débutants") n'interviennent que dans la phase d'analyse de la démarche CRISTAL, tandis que le système développé porte sur la détection du mode de vigilance. Le système et la base de règles de combinaison sont donc uniques et similaires pour tous et pour différents types de situations. C'est en phase d'analyse en effet que les facteurs humains, donc le niveau du groupe par exemple, ou la prise en compte des pièges du terrain (i.e., l'exposition), comme la présence d'une barre rocheuse en dessous du passage clé, interviennent. Ils permettent de répondre, suite à la détection objective du mode de vigilance adapté aux critères évalués, aux questions "le groupe est-il capable d'éviter le danger ?" ou "le groupe est-il en mesure de réduire le risque ?".

Les deux sections ci-dessous présentent respectivement le niveau d'agrégation  $n$  et les niveaux préalables.

### 4.2.1 Des cinq critères vers les modes de vigilance

Dans cette section, nous présentons le niveau de combinaison  $n$ , qui permet le passage des cinq critères vers les modes de vigilance. Les valeurs de sortie qu'il permet d'obtenir sont donc les quatre modes de vigilance *Détendu*, *Méfiant*, *Alerté* et *Hasardeux*.

Notons que nous exploitons cette section comme un support permettant de présenter la méthode que nous avons suivie pour développer l'ensemble des règles de combinaison du système. Cette méthode est donc présentée au fil de cette section. Si elle est donnée dans le cadre de cette agrégation de niveau  $n$ , nous avons suivi le même principe pour les niveaux préalables.

D'abord, nous avons défini l'ensemble des valeurs que les critères sont susceptibles de prendre. Ces développements ont été menés en collaboration avec l'expert associé à notre projet. Le nombre de valeurs possibles (donc de sous-ensembles associés à chaque critère) diffère selon le critère considéré. Ce nombre dépend en effet de la capacité de l'expert à différencier plus ou moins de nuances sur chacun d'eux et pouvoir caractériser des situations différentes associées à ces fines nuances. Les catégories définies reflètent donc ce que l'expert est capable de discriminer, ce qui conduit à différents niveaux de granularité propres à chacun des critères.

Pour ce niveau de combinaison, nous avons donc associé à chaque critère trois à quatre valeurs

graduées de sortie possibles. Ces valeurs sont explicitées de la manière suivante :

- 0, 4, 8, 12, dans le cas de quatre valeurs graduées ;
- 0, 6, 12, dans le cas de trois valeurs graduées.

Ces valeurs chiffrées ne sont autres qu'une notation permettant de simplifier les échanges au cours des développements. Cela permet d'alléger les termes (nombreux, variés, et propres à chaque élément) employés par les experts. Elles se substituent donc au nom des différents sous-ensembles flous et sont toutes, en réalité, associées à des termes à valeur dans l'univers du discours exploités par l'expert. Nous avons alors décliné :

- Trois valeurs possibles pour le critère C2 *Inclinaison des pentes*, associées aux significations suivantes :
  - 0 - *Situation sûre* correspondant à une situation dénotant l'absence de pente d'inclinaison supérieure à 30° dans la zone fréquentée par le skieur, ainsi que directement en dessous ou au dessus (ou alors de façon suffisamment éloignée) ;
  - 6 - *Situation incertaine* correspondant par exemple, aux situations suivantes : situation 1, les pentes en amont menacent le skieur, mais ce dernier n'est pas certain d'être atteint en cas de déclenchement d'une avalanche en amont ; situation 2, le skieur se trouve à l'intérieur d'une enveloppe CLPA, pourtant le modèle théorique basé sur la distance d'arrêt des avalanches indique qu'il n'est pas atteignable par une avalanche. Dans ces deux situations la valeur 6 - *Situation incertaine* est attribuée et ce quelle que soit la surface mobilisable. La valeur 6 - *Situation incertaine* est aussi attribuée lorsque la situation est caractérisée par le fait que les pentes fréquentées sont d'inclinaison supérieure à 30°, que les pentes en aval peuvent emporter le skieur ou encore que les pentes en amont peuvent l'atteindre en cas de déclenchement, mais que la surface mobilisable est faible.
  - 12 - *Situation dangereuse* correspondant à une situation caractérisée par le fait que les pentes fréquentées sont d'inclinaison supérieure à 30°, que les pentes en aval peuvent emporter le skieur ou encore que les pentes en amont peuvent l'atteindre en cas de déclenchement et que la surface mobilisable est grande.
- Quatre valeurs possibles pour le critère C3 *Observations d'avalanches récentes* qui peuvent être explicitées de la façon suivante :
  - 0 - *Situation non critique* signifiant qu'aucune avalanche récente n'a été observée ou que les observations d'avalanches récentes réalisées ne sont pas critiques vis-à-vis de la zone fréquentée par le skieur ;
  - 4 - *Situation peu critique* correspondant à une première situation intermédiaire (plus proche de 0), évaluée sur la base du nombre d'avalanches récentes observées et de leurs criticités (elles-mêmes dépendantes de la Taille de l'avalanche, de sa Similitude avec la zone fréquentée par le skieur et de sa Localisation). Dans cette situation, il s'agit par exemple d'une ou plusieurs avalanches de petite taille, observées dans un massif voisin et le plus souvent dans des pentes d'orientation et/ou altitude différentes de celles fréquentées par les utilisateurs de la méthode ;
  - 8 - *Situation moyennement critique* correspondant à une seconde situation intermédiaire (plus proche de 12), évaluée sur les mêmes bases que le cas précédent. Dans cette situation, il s'agit par exemple de plusieurs avalanches de taille petite à moyenne, observées dans le même massif mais dans des pentes d'orientation différentes et toutefois à des altitudes proches de celles envisagées par le skieurs.
  - 12 - *Situation très critique* signifiant qu'une ou plusieurs avalanches récentes ont été observées et que ces avalanches présentent une criticité importante par rapport à la zone fréquentée par le skieur.

- Trois valeurs possibles pour le critère C4 *Augmentation de température, fonte* afin de décliner les situations suivantes :
  - 0 - *Nulle* s'il y a ni augmentation de température ni fonte ;
  - 6 - *Moyenne* dans le cas d'une situation intermédiaire caractérisée par une fonte du manteau neigeux en surface ;
  - 12 - *Forte* si le manteau neigeux est fortement impacté par l'augmentation de température et la fonte.
- Trois valeurs possibles pour le critère C5 *Surcharges nouvelles* afin de décliner les situations suivantes :
  - 0 - *Nulle* s'il n'y a pas de surcharge nouvelle ;
  - 6 - *Moyenne* dans le cas d'une situation intermédiaire (dont l'ordre de grandeur évoqué peut être de 20 à 30 cm de neige fraîche) ;
  - 12 - *Forte* s'il y a une forte surcharge nouvelle (dont l'ordre de grandeur évoqué peut correspondre à plus de 50 cm de neige fraîche).
- Quatre valeurs possibles pour le critère C6 *Couche fragile enfouie* qui décrivent les cas ci-dessous :
  - 0 - *Absente* caractérisant une situation sûre où aucune couche fragile n'est présente dans le manteau neigeux ;
  - 4 - *Peu efficace* signifiant la présence d'une couche fragile, mais cette dernière n'étant que peu ou pas efficace (détectée par un test de propagation négatif) ;
  - 8 - *Moyennement efficace* marquant la présence d'une couche fragile moyennement efficace dans le manteau neigeux (caractérisée par une propagation moyenne dans la couche fragile ou la mise en évidence d'une couche fragile discontinue) ;
  - 12 - *Tres efficace* caractérisant la présence d'une couche fragile efficace (identifiée par une très forte propagation dans la couche fragile).

Nous avons ensuite extrait les règles expertes permettant de combiner les critères et leurs différentes valeurs possibles en un résultat final. Nous avons d'abord établi les règles les plus simples, ne contenant pas d'ambiguïté. Ces règles correspondent en général aux règles les plus extrêmes. Par exemple, dans le cas où chacun des cinq critères prend la valeur 0, alors le mode de vigilance résultant en sortie est *Détendu*, i.e., le mode de vigilance le plus faible qu'il est possible d'obtenir. À l'inverse, si l'ensemble des cinq paramètres est fixé à 12, le mode de vigilance de sortie sera *Hasardeux*. Au-delà de ces règles extrêmes, nous avons aussi établi les règles qui conduisent aux valeurs de sortie les plus extrêmes (i.e., *Détendu* ou *Hasardeux*), puisque ces situations contiennent elles-aussi que très peu d'ambiguïté. Par exemple, si le critère C2 relatif à l'inclinaison des pentes vaut 0 *Situation sûre*, les experts savent qu'aucune avalanche ne devrait se déclencher. Dans cette situation, quelles que soient les valeurs prises par les autres critères, le mode de vigilance donné en sortie est alors *Détendu*. Notons cependant que nous reviendrons en Section 4.3.2 sur cette définition qui s'avère en réalité plus nuancée, incluant finalement une notion d'anticipation.

À ce stade, connaissant le nombre de valeurs possibles associées à chacun des cinq critères, nous pouvons calculer le nombre de combinaisons théoriques qu'il est possible d'avoir :

$$3 \times 4 \times 3 \times 3 \times 4 = 432.$$

Certaines combinaisons ne peuvent pas être rencontrées dans la réalité. La combinaison :

[C2 - 6 *Situation incertaine* ; C3 - 12 *Situation très critique* ; C4 - 0 *Nulle* ; C5 - 6 *Moyenne* ; C6 - 0 *Absente*] est en effet impossible car, en l'absence d'augmentation de température ou fonte et de couche fragile enfouie (i.e., C4 à 0 et C6 à 0), il ne peut pas y avoir de situation très critique vis-à-vis des avalanches récentes observées (i.e., C3 à 12) sans une très forte surcharge (i.e., C5 à 12). De même, la combinaison :

[C2 - 6 *Situation incertaine* ; C3 - 12 *Situation très critique* ; C4 - 0 *Nulle* ; C5 - 0 *Nulle* ; C6 - 4 *Peu efficace*]

est impossible car en l'absence d'augmentation température ou fonte et de surcharge (i.e., C4 à 0 et C5 à 0), la couche fragile ne peut pas être évaluée à 4 si les observations d'avalanches récentes sont très critiques (i.e., C3 à 12). Cela dénote en effet l'existence d'une couche fragile persistante et donc qui propage bien; la valeur de C6 sera alors supérieure ou égale à 8. Ainsi, deux combinaisons théoriques sont donc impossibles.

Nous avons ensuite établi l'ensemble des règles restantes pour prendre en considération les 430 combinaisons possibles. Bien sûr, une règle est susceptible de couvrir plusieurs combinaisons. Dans l'exemple cité précédemment, où nous obtenons le mode de vigilance *Détendu* lorsque C2 prend la valeur 0 - *Situation sûre* et quelles que soient les valeurs associées aux autres critères, alors la règle couvre 144 combinaisons à elle seule. Bien sûr, toutes les règles intermédiaires, caractérisant des situations moins extrêmes donc plus sensibles et nuancées, sont plus précises et couvrent un nombre plus restreint de combinaisons.

Nous avons utilisé la librairie jFuzzyLogic [Cingolani2013] pour implémenter le système flou global d'aide à la détection. Un exemple clair de règle est exprimé ci-dessous en utilisant le langage FCL [Cingolani2013] et les notations évoquées ci-avant :

```

IF C2_Inclinaison_Pentes IS Situation_Incertaine AND
    C3_Observations_Avalanches_Recentes IS Situation_Peu_Critique AND
    C4_Augmentation_Temperature_Fonte IS Nulle AND
    C5_Surcharges_Nouvelles IS Moyenne AND
    C6_Couche_Fragile_Enfouie IS Peu_Efficace
THEN Mode_Vigilance IS Alerte.

```

Nous avons au final généré 29 règles permettant de couvrir les 430 combinaisons possibles. L'ensemble des règles établies pour ce niveau d'agrégation est donné en Annexe D.1.

À ce stade, la dernière étape mise en œuvre consiste à vérifier l'absence de règles antagonistes dans la base de règles. Deux règles seraient antagonistes si elles conduisent à deux valeurs de sortie différentes tout en pouvant être, toutes les deux, activées par une unique combinaison.

Notons que lors de la création des règles expertes, nous avons tenu compte d'une certaine anticipation, notamment en ce qui concerne le critère C3 relatif aux observations d'avalanches récentes. Le fait que le critère C3 se voit attribuer la valeur 0 *Situation non critique* ne signifie pas qu'aucune avalanche a eu lieu récemment, mais bien qu'aucune observation d'avalanche récente n'a été faite. Ceci signifie donc que le skieur est susceptible d'arriver le premier dans le secteur, après un temps perturbé et donc être le premier en mesure de réaliser des observations, celles-ci pouvant lui être fatales. Il est aisé de penser que l'absence d'observations d'avalanche, après un temps non perturbé et des conditions stables, signifie réellement qu'il n'y a pas d'avalanches récentes dans le secteur, tandis qu'après un temps perturbé, cela revient à ce qu'il n'y a en effet pas eu d'observation, mais que des avalanches peuvent cependant s'être produites ou se produire dans un futur proche. Ainsi, l'évaluation de la question "suite à un temps perturbé ou non" fait sens. Cependant, la prise en compte d'une telle question sur le critère C3 *Observations d'avalanches récentes* n'est pas pertinente du fait de l'hypothèse premièrement formulée d'indépendance des paramètres pour des raisons de simplification. Questionner un sous-critère de ce type reviendrait en effet à induire de la redondance dans les informations considérées (cela étant pris en compte à travers les surcharges récentes de neige fraîche ou encore l'augmentation de température). C'est donc directement dans la combinaison des règles que cela est pris en considération :

- si C3 vaut 0 *Situation non critique* mais que le critère C6 indique la présence d'une couche fragile efficace et que les critères C4 et/ou C5 sont caractérisés par d'importantes valeurs de surcharge ou d'augmentation de température, alors peut être qu'il n'y a simplement pas encore eu d'observation et, dans ce cas, le mode de vigilance n'est pas fixé à *Détendu* mais est directement estimé à une valeur correspondant à un mode de vigilance plus élevé.
- si C3 vaut 0 *Situation non critique* et que les critères C4 et C5 valent tous les deux 0 *Nulle*, alors on peut davantage penser qu'il n'y a réellement pas eu d'avalanche récemment (et non pas seulement absence d'observation), dans ce cas, le mode de vigilance obtenu en sortie de

la combinaison peut valoir *Détendu*.

#### 4.2.2 Niveaux d'agrégation préalables

Pour les niveaux d'agrégation préalables, nous travaillons critère par critère (il y aura donc cinq niveaux d'agrégation  $n-1$ ), puis sous-critère par sous-critère etc. Ces niveaux d'agrégation sont construits en ayant en tête les règles de combinaison des niveaux suivants (par exemple les niveaux  $n$  et  $n-1$  pour construire le niveau  $n-2$ ), puisque ces niveaux ont été établis au préalable.

Les niveaux d'agrégation  $n-1$  et  $n-2$  sont présentées ci-dessous dans le cas du critère C2 *Inclinaison des pentes* qui a été particulièrement développé dans nos travaux.

##### Niveau d'agrégation $n-1$ : cas du critère C2

Dans le cas du critère C2 *Inclinaison des pentes* et pour ce niveau d'agrégation ( $n-1$ ), les valeurs qu'il est possible d'obtenir en sortie sont les valeurs 0, 6 et 12 définies dans la section précédente. Pour rappel, ces valeurs sont comme suit :

- 0 - *Situation sûre*,
- 6 - *Situation incertaine*,
- 12 - *Situation dangereuse*.

Les valeurs que les sous-critères à combiner sont susceptibles de prendre sont celles définies aux Chapitres 2 et 3. Pour l'ensemble des sous-critères, ces valeurs sont donc les suivantes :

- Deux valeurs possibles pour C2.1 *CLPA* :
  1. Non,
  2. Oui.
- Deux valeurs possibles pour C2.2 *Pentes fréquentées* :
  1. Pentes non-avalancheuses,
  2. Pentes avalancheuses.
- Deux valeurs possibles pour C2.3 *Pentes en amont* :
  1. Pentes non-avalancheuses,
  2. Pentes avalancheuses.
- Trois valeurs possibles pour C2.4 *Peut atteindre le skieur* :
  1. Non (position sûre),
  2. Position intermédiaire,
  3. Oui (position dangereuse).
- Deux valeurs possibles pour C2.5 *Pentes en aval* :
  1. Pentes non-avalancheuses,
  2. Pentes avalancheuses.
- Trois valeurs possibles pour C2.6 *Peut emporter le skieur* :
  1. Non (position sûre),
  2. Position intermédiaire,
  3. Oui (position dangereuse).
- Trois valeurs possibles pour C2.7 *Surface mobilisable* :
  1. Nulle,
  2. Faible,

## 3. Grande.

Si nous pouvons naturellement penser que ce niveau d'agrégation regroupe 432 combinaisons théoriques (puisque  $2 \times 2 \times 2 \times 3 \times 2 \times 3 \times 3 = 432$ ), nous devons en réalité distinguer deux cas distincts. Dans un cas, tous les sous-critères interviennent, dans l'autre, seule une sous-partie est questionnée, ce qui conduit à un nombre réduit de combinaisons théoriques. Ces deux cas distincts sont liés à l'inclinaison des pentes fréquentées, et se définissent de la façon suivante :

- Dans le cas où C2.2 *Pentes fréquentées* prend la valeur *Pentes non-avalancheuses*, i.e., dans le cas où la pente sous les pieds du skieur est dans des inclinaisons inférieures à  $30^\circ$  ou supérieures à  $65^\circ$ , alors tous les sous-critères sont interrogés. Cela conduit donc à :  $2 \times 2 \times 3 \times 2 \times 3 \times 3 = 216$  combinaisons théoriques.
- Dans le cas où C2.2 *Pentes fréquentées* prend la valeur *Pentes avalancheuses*, i.e., dans le cas où la pente sous les pieds du skieur est dans des inclinaisons comprises entre  $30^\circ$  et  $65^\circ$ , alors il devient inutile de questionner les sous-critères relatifs aux pentes en amont et en aval du skieur, celui-ci étant directement menacé par la pente qu'il fréquente (voir Chapitre 2). Cela conduit donc à :  $2 \times 3 = 6$  combinaisons théoriques.

Au total, nous comptons donc  $216 + 6 = 222$  combinaisons théoriques.

D'une part, parmi les 216 combinaisons, 154 ne peuvent pas se produire dans la réalité et sont donc impossibles. En effet, il est par exemple impossible qu'un skieur puisse être atteint par une avalanche si les pentes en amont ne pas pas avalancheuses (i.e., C2-6 à 6 ou 12 alors que C2-5 est à 0). Il ne reste donc que 62 combinaisons possibles. D'autre part, parmi les 6 combinaisons 2 sont impossibles (puisque si les pentes sous les pieds du skieur sont avalancheuses (i.e., C2-2 à 12), l'ampleur potentielle de l'avalanche que peut fournir la pente (i.e., la surface mobilisable) ne peut pas être nulle (i.e., C2-7 à 0)). Seules 4 combinaisons sont donc possibles. Ainsi, les règles développées pour le niveau d'agrégation *n-1* dans le cas du critère C2 *Inclinaison des pentes* doivent couvrir au total 66 combinaisons possibles.

En suivant la même démarche que dans le cas de l'agrégation de niveau *n*, nous avons établi l'ensemble des règles permettant de couvrir ces 66 combinaisons. Deux exemples de règles sont donnés ci-dessous en utilisant le langage FCL [Cingolani2013]. Le premier exemple correspond au cas où les pentes fréquentées ne sont pas propices aux avalanches et donc où tous les sous-critères sont interrogés. Il s'agit des règles associées aux 62 combinaisons possibles. Ces règles ont la particularité de toujours contenir l'indication "C2.2\_Pentes\_Frequentees IS Pentes\_Non\_Avalancheuses". Le second exemple correspond au cas où les pentes fréquentées sont propices aux avalanches et donc où une partie des sous-critères n'est pas interrogée (C2.3, C2.4, C2.5, C2.6). Il s'agit des règles associées aux 4 combinaisons possibles. Ces règles ont la particularité de toujours contenir l'indication "C2.2\_Pentes\_Frequentees IS Pentes\_Avalancheuses".

Exemple 1 :

```

IF C2.1_CLPA IS Non AND
  C2.2_Pentes_Frequentees IS Pentes_Non_Avalancheuses AND
  C2.3_Pentes_Amont IS Pentes_Avalancheuses AND
  C2.4_Peut_Atteindre_Skieur IS Position_Intermediaire AND
  C2.5_Pentes_Aval IS Pentes_Avalancheuses AND
  C2.6_Peut_Emporter_Skieur IS Oui_Position_Dangereuse AND
  C2.7_Surface_Mobilisable IS Grande
THEN C2_Inclinaison_Pentes IS 12_Situation_Dangereuse.

```

Exemple 2 :

```

IF C2.1_CLPA IS Non AND
  C2.2_Pentes_Frequentees IS Pentes_Avalancheuses AND
  C2.7_Surface_Mobilisable IS Grande
THEN C2_Inclinaison_Pentes IS 12_Situation_Dangereuse.

```

L'ensemble des 24 règles établies pour ce niveau d'agrégation est donné en Annexe D.2.1.

### Niveau d'agrégation $n-2$ : cas du sous-critère C2.6

Afin de poursuivre avec le critère C2, nous présentons, pour détailler le niveau  $n-2$ , le cas du sous-critère C2.6 *Peut emporter le skieur*. Il s'agit du seul sous-critère relatif à C2 qui est décomposé en paramètres (donc nécessite une agrégation) et qui n'est pas issu d'un système d'évaluation automatique. C2.4 *Peut atteindre le skieur* est, en effet, également décomposé en paramètres mais n'est pas issu d'une base de règles ; il est obtenu par le système d'évaluation automatique basé sur la distance d'arrêt des avalanches détaillé au Chapitre 3.

Dans le cas du sous-critère C2.6 *Peut emporter le skieur* et pour ce niveau d'agrégation ( $n-2$ ), les valeurs qu'il est possible d'obtenir en sortie sont les trois valeurs présentées dans la section propre au niveau  $n-1$ , à savoir :

1. *Non (position sûre)*,
2. *Position intermédiaire*,
3. *Oui (position dangereuse)*,

Ce niveau d'agrégation, pour cet exemple, combine les deux paramètres C2.6<sub>1</sub> *Distance* et C2.6<sub>2</sub> *Inclinaison*. Les valeurs que les paramètres à combiner sont susceptibles de prendre sont les valeurs définies au Chapitre 2, c'est-à-dire :

- Cinq valeurs possibles pour C2.6<sub>1</sub> *Distance* :
  1.  $\leq 1$  m,
  2. autour de 5 m,
  3. autour de 10 m,
  4. autour de 20 m,
  5.  $\geq 30$  m.
- Quatre valeurs possibles pour C2.6<sub>2</sub> *Inclinaison* :
  1.  $\leq 15^\circ$ ,
  2. autour de  $25^\circ$ ,
  3. autour de  $28^\circ$ ,
  4. autour de  $30^\circ$ .

Ce niveau d'agrégation regroupe donc  $5 \times 4 = 20$  combinaisons théoriques. Toutes les combinaisons peuvent être rencontrées en réalité, donc les règles développées pour ce niveau d'agrégation doivent couvrir ces 20 combinaisons possibles.

Un exemple de règle est donné ci-dessous en utilisant le langage FCL [[Cingolani2013](#)].

**IF** C2.6<sub>1</sub>\_Distance **IS** 1m **AND**

C2.6<sub>2</sub>\_Inclinaison **IS**  $25^\circ$

**THEN** C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Oui\_Position\_Dangereuse.

Chacune des 8 règles permettant de couvrir les 20 combinaisons possibles est disponible en Annexe [D.2.1](#).

### Synthèse

À l'issue de cette section nous obtenons une vue d'ensemble du système global pour l'aide à la décision. Celui-ci exploite plusieurs niveaux de combinaisons permettant de ne combiner, à chaque fois, qu'un nombre réduit d'éléments. Nous avons présenté et illustré le niveau d'agrégation  $n$  permettant de passer des critères aux modes de vigilance. De même, deux niveaux d'agrégation préalables ont été présentés et détaillés dans le cas du critère C2 *Inclinaison des pentes*. De manière générale, les niveaux de combinaison préalable sont prévus pour permettre l'obtention progressive des paramètres, puis sous-critères et enfin critères.

Le tableau de synthèse ci-dessous (voir Tableau [4.1](#)) renseigne sur l'ensemble des combinaisons

#### 4.2. Système de fusion : des éléments de base aux modes de vigilance

	Critères	Sous-critères	Paramètres	Sous-paramètres	...
	Inclinaison des pentes	CLPA	/	/	/
		Pentes fréquentées	/	/	/
		Pentes en amont	/	/	/
		Peut atteindre le skieur	Dénivelé de pente >30°	/	/
			Distance horizontale	/	/
		Pentes en aval	/	/	/
		Peut emporter le skieur	Distance	/	/
			Inclinaison	/	/
		Surface mobilisable			
		Modes de vigilance	Observations d'avalanches récentes	$n \times$ Criticité	Localisation
Localisation avalanche					
Localisation skieur					
Similitude	Altitude				
	Exposition				
Taille	Largeur pente				/
	Largeur avalanche				/
	Épaisseur avalanche				/
Récence					
Augmentation de température, fonte	Augmentation de température				
	Humidification du manteau neigeux				
	Épaisseur croûte de regel				
	Effet positif				
Surcharges nouvelles	Vent				
	Neige				
	Pluie				
	Ancienneté				
Couche fragile enfouie	Présence		Type d'avalanches locales observées	/	/
			Couche fragile	/	/
	Efficacité		Type d'avalanches locales observées	/	/
		Propagation (mesure)	/	/	
		Propagation (caractérisation)	/	/	
		Extrapolation			

Cellule à fond bleu : combinaison ou fuzzification provenant de règles ou valeurs expertes ; rose : combinaison ou fuzzification issue de statistiques ; gris : description naturelle ; blanc : élément non traité, uniquement évoqué ; Éléments écrits en gris : perspective d'intégration

Tableau 4.1 – Synthèse du système global

(i.e., passage de sous-paramètres à un paramètre, passage de paramètres à un sous-critère, de sous-critères à un critère ou encore des critères au mode de vigilance) ou fuzzification (i.e., description floue du plus petit élément relatif à un critère) établies dans ces travaux. Elles peuvent notamment :

- soit provenir de règles expertes,
- soit être issues de statistiques, à travers les principaux travaux développés au Chapitre 3.

Afin de donner une vue d'ensemble complète, ce tableau donne aussi les éléments qui émergent d'une description naturelle (c'est le cas par exemple quand il s'agit de savoir si oui ou non nous sommes à l'intérieur d'une enveloppe CLPA ou quand il s'agit de questionner le type d'avalanches observées). Il reprend également les éléments non traités (i.e., qui ont uniquement été évoqués) ou encore ceux qui prennent part à une perspective d'intégration à plus long terme.

A ce stade, ce chapitre a donc permis de définir les différentes phases de combinaisons exploitées dans le système de fusion d'informations développé. Il a conduit à la formalisation du système de fusion permettant de passer des cinq critères principaux (déclinés en sous-critères, paramètres, etc.) aux quatre modes de vigilance. Il explicite donc la phase de détection de CRISTAL, assistant l'utilisateur dans son évaluation, pour lui permettre d'adopter le comportement le plus adapté possible à la situation. Ce chapitre contribue ainsi à l'élucidation du processus de transformation de la démarche CRISTAL en une méthode à part entière.

Suite à cette co-construction avec un expert d'un système de fusion permettant l'évaluation du mode de vigilance à adopter, basé sur un ensemble de règles, arrive la nécessaire étape de validation.

### 4.3 Mise en œuvre et validation

Cette section présente une validation du système développé. Il est d'abord essentiel de remarquer que, comme nous avons pu le mentionner en fin de Section 1.2.3 du Chapitre 1, il est difficile de conduire une comparaison précise des différentes méthodes d'aide à la décision entre elles. D'une part, ceci s'explique par la difficulté à obtenir l'ensemble des données nécessaires à cette comparaison sans être impacté par des valeurs manquantes. D'autre part, l'influence de la mise en œuvre des différentes méthodes dans diverses régions du monde, où les conditions sont variables et pour lesquelles les méthodes peuvent être spécifiquement adaptées ou non, complique la tâche de comparaison. C'est pourquoi, dans ce manuscrit, nous ne proposons pas de validation de la méthode développée par rapport aux autres méthodes existantes. Aucune comparaison des performances de notre méthode par rapport aux autres n'a en effet été conduite à ce jour. Cependant nous proposons de valider que la connaissance de l'expert est bien retranscrite dans le système.

#### 4.3.1 Discussion : peut-on valider le système ?

Il est utile de questionner les cas qui peuvent être validés ou non. Tout d'abord, deux manières peuvent être envisagées pour tester et valider le système développé :

1. sur la base de cas pratiques observés sur le terrain,
2. sur la base de mises en situation expertisées.

Dans le premier cas, certaines situations peuvent être validées ou invalidées, d'autres non. Qu'en est-il en effet des cas d'avalanches et des cas de non-avalanches ? L'analyse de plusieurs cas typiques présentés ci-dessous permet de répondre à la question de ce qui peut être validé ou non.

**Situation 1 :** le système donne en sortie un mode de vigilance *Alerté* ou *Hasardeux*, l'utilisateur décide d'aller skier la pente considérée et un accident survient.

Dans ce cas, la situation était correctement évaluée par le système et il est possible d'affirmer que

le résultat est valide.

**Situation 2 :** le système donne en sortie un mode de vigilance *Détendu* et une avalanche survient à proximité de l'itinéraire, voire un mode de vigilance *Méfiant* et un accident d'avalanche a lieu (situation 2bis).

Dans ces deux cas, la situation n'était pas correctement évaluée par le système et il est possible d'affirmer que le résultat est invalide.

**Situation 3 :** le système donne en sortie un mode de vigilance *Détendu* et aucune avalanche ne survient, ni sur l'itinéraire ni à proximité.

Dans ce cas, nous pouvons penser que la situation était correctement évaluée par le système et que le résultat est valide. Cependant, nous ne sommes pas en mesure de l'affirmer, puisque l'avalanche est un phénomène complexe, il existe des situations pour lesquelles, bien que le manteau neigeux soit au bord de la rupture, aucune avalanche ne soit déclenchée. Dans ce cas, on ne peut pas conclure sur le fait que l'estimation était correcte ou si la situation pratique, par chance, n'a pas conduit au déclenchement d'une avalanche. Il est donc impossible d'affirmer la validité du résultat.

**Situation 4 :** le système donne en sortie un mode de vigilance *Alerté* ou *Hasardeux*, l'utilisateur décide d'aller skier la pente considérée mais aucun accident d'avalanche ne survient.

Dans ce cas, cela ne signifie pas que la situation détectée par le système n'était pas correcte et que le résultat est invalide. Cela signifie simplement que l'avalanche ne s'est pas déclenchée, par contre et pour les mêmes raisons que dans la situation précédente, il est impossible de conclure quant au fait que le manteau neigeux soit instable et au bord de la rupture ou non ; il est donc impossible de conclure quant à la validité ou l'invalidité du résultat.

Ainsi, si les cas d'avalanches peuvent être validés, dans les cas de non-avalanche, que ce soit pour les modes de vigilance faibles pour conclure à un résultat valide (*Détendu* ou *Méfiant*, comme dans la situation 3) ou pour les modes de vigilance élevés pour conclure à un résultat invalide (*Alerté* ou *Hasardeux*, comme dans la situation 4), il n'est pas possible de conclure quant à la validité ou l'invalidité du résultat communiqué par le système par l'intermédiaire d'un cas pratique réalisé et observé sur le terrain. Du fait de la complexité du phénomène avalancheux les situations de non-avalanche sont ambivalentes et difficiles à appréhender, tester et valider. Dans ce contexte, nous décidons donc dans nos travaux de valider le système sur la base de mises en situations expertisées, c'est-à-dire en comparant le résultat communiqué par le système au résultat expert attendu pour différentes situations. Cela permet de vérifier la capacité du système à communiquer des résultats en accord avec des résultats expertisés.

Dans le second cas, nous analysons, sur la base de connaissances expertes, des mises en situations réelles qui permettent d'une part l'amélioration continue du système développé (Section 4.3.2) et d'autre part la validation des niveaux d'agrégation  $n$  et  $n-1$  relatifs au critère C2 *Inclinaison des pentes* (Section 4.3.3).

Ainsi, comme nous nous plaçons dans le cas 2 évoqué ci-dessus (i.e., validation sur la base de mises en situation expertisées) et non dans le cas 1 (i.e., validation sur la base de cas pratiques sur le terrain), nous validons le fait que la connaissance de l'expert est bien retranscrite dans le système. Nous n'analysons donc pas les performances du système en situation d'utilisation réelle, ni sur des cas d'avalanches existants. L'analyse des performances du système développé, sur des cas d'avalanches (i.e., situations pouvant être validées ou invalidées), devra être réalisée à l'avenir. Ainsi, il s'agira d'analyser si le système rend bien, dans ces situations, un mode de vigilance *Alerté* ou *Hasardeux* afin d'en estimer la probabilité de bonne détection et le taux de fausse alarme. Cette analyse fait l'objet de perspectives à ces travaux et seule la bonne retranscription des connaissances de l'expert dans le système de fusion hiérarchique est étudiée ici.

### 4.3.2 Cas concrets et amélioration continue

Les cas de mise en défaut du système nous permettent de procéder à son amélioration. Les cas de mise en échec, en effet, permettent d'appréhender les éléments de l'expertise non capturés dans

le système et de procéder à une amélioration continue. Ainsi, une première phase de comparaison entre le mode de vigilance obtenu en sortie et le mode de vigilance donné par un expert pour une situation donnée nous permet de détecter ces situations. Grâce à cela, nous avons mis en évidence les besoins suivants :

- conduire une évaluation locale et à distance permettant la distinction entre les modes *Détendu* et *Méfiant*,
- considérer l'ampleur d'une avalanche potentielle du fait de la pente, i.e., la surface mobilisable, permettant la distinction entre les modes *Alerté* et *Hasardeux*.

Ces deux points sont détaillés dans les sections suivantes.

### Besoin d'une double évaluation : évaluation locale et à distance

En testant des cas concrets, nous avons identifié que le système ne permettait pas de capturer la véritable essence du mode *Méfiant*. L'exemple suivant, donné en Tableau 4.2, illustre et explicite ce propos. Notons qu'initialement, lors du développement du système de fusion, le mode *Méfiant* était considéré comme un mode graduel entre les modes *Détendu* et *Alerté*. Des règles spécifiques ont donc été développées le concernant, mais à l'issue de discussions et mises en situation, nous avons identifié le rôle particulier (décrit ci-dessous) associé à ce mode de vigilance. Cette identification et la nécessité d'une double évaluation (locale et à distance) pour régir le passage du mode *Détendu* au mode *Méfiant* représentent alors une avancée par rapport à l'approche CRISTAL initiale.

C2	C3	C4	C5	C6	Mode de vigilance (expert)	Mode de vigilance (système)
0	8	0	6	12	Méfiant	Détendu

*C2 Inclinaison des pentes, C3 Observations d'avalanches récentes, C4 Augmentation de température, fonte, C5 Surcharges nouvelles, C6 Couche fragile enfouie.*

Tableau 4.2 – Comparaison des modes de vigilance estimés par un expert et par le système à proximité de la Pointe des Ratissières le 30 décembre 2020

Dans cet exemple, on peut se demander pourquoi l'expert est *Méfiant* tandis que le système donne le mode de vigilance *Détendu*. Au vu des valeurs données aux différents critères, il est vrai qu'aucune avalanche n'est possible au niveau de la zone étudiée (i.e., *ici*), d'où le mode *Détendu*. Cependant, l'expert a analysé qu'une avalanche est possible *là-bas* (i.e., dans le secteur, mais sans affecter la pente fréquentée par le skieur au moment de l'évaluation) puisque la pente y est plus importante. On peut remarquer en effet en le testant dans le système que si l'on augmente la valeur du critère C2 *Inclinaison des pentes* (de 0 - *Situation sûre* à 6 - *Situation incertaine*) alors le système donne le mode de vigilance *Alerté*, signifiant qu'une avalanche est possible.

Ainsi, nous en déduisons que pour capturer le passage du mode de vigilance *Détendu* au mode de vigilance *Méfiant*, il est nécessaire d'estimer le danger qu'est susceptible de rencontrer l'utilisateur à distance (i.e., *là-bas*). Ceci est en accord avec les définitions même des quatre modes de vigilance de la démarche CRISTAL. Les modes de vigilance prennent donc en compte une notion d'anticipation du danger à venir. Pour cela, nous intégrons la prise en compte du mouvement du skieur (i.e., le fait que l'utilisateur soit statique ou dynamique). Cela permet d'estimer le danger *ici*, i.e., sous les pieds du skieur statique, tout en considérant ce qu'il en est *là-bas*, i.e., suite à un déplacement du skieur dynamique.

Pour capturer cela, une double évaluation (locale et à distance) est nécessaire. Nous avons donc intégré dans le système cette double évaluation permettant d'analyser chacun des critères à la fois *ici*, i.e., sous les pieds du skieur et *là-bas*, à distance. Cette évaluation à distance est rendue

possible par la prise en compte d'une zone tampon qui permet de questionner les mêmes critères mais aux alentours de la zone fréquentée par le skieur.

La taille de la zone tampon est variable selon les situations afin de permettre à l'utilisateur de disposer de l'anticipation nécessaire à l'évitement de tout effet de surprise dû à un changement de conditions ou de déclivité du terrain. Elle doit donc être fixée sur la base de plusieurs critères : le sens d'évolution du skieur (à la montée vs à la descente), la visibilité dont il dispose sur le terrain (bonne visibilité vs mauvaise visibilité), mais aussi la taille du groupe ainsi que le type de terrain. Ainsi, plus le skieur va vite et plus il est nécessaire de prendre en compte ce qui est loin ; la zone tampon sera donc plus grande si le skieur est à la descente que s'il est à la montée. De même, l'anticipation étant réduite en cas de mauvaise visibilité, la zone tampon sera donc plus grande en cas de mauvaise visibilité que par bonne visibilité. La représentation de la zone tampon est visible sur la Figure 4.18. Dans cet exemple, le skieur évolue à la montée. Le cercle orange continu correspond à une zone tampon de 100 mètres de rayon ; il s'agit, d'après notre expert, de la zone tampon que devrait considérer l'utilisateur du système en cas de mauvaise visibilité et dans cette situation (sens d'évolution, configuration du terrain, groupe considéré). Le cercle orange et noir discontinu (centré sur le précédent) correspond à une zone tampon de 15 mètres de rayon ; il s'agit, d'après notre expert, de la zone tampon à considérer dans ce même cas par bonne visibilité. L'impact de la dimension de la zone tampon est bien visible ici : dans le premier cas, les pentes d'inclinaison supérieure à  $30^\circ$  (colorées sur la carte) intersectent le disque défini par la zone tampon, ce qui n'est pas le cas par bonne visibilité, le skieur risquant moins de dévier de son itinéraire. Du fait de la taille de la zone tampon, les valeurs des critères et *in fine* du mode de vigilance obtenu pourront s'en trouver modifiées. La représentation de la zone tampon est aussi visible sur les cartes des exemples détaillés ci-dessous (voir Figures 4.19a et 4.20a). Dans le premier exemple (Figure 4.19), la zone tampon a un diamètre fixée à 400 m puisqu'il s'agit d'un groupe de skieurs (ce qui nécessite d'anticiper le fait que certains membres du groupe s'écartent de la trace) évoluant à la descente (ce qui induit une vitesse de déplacement rapide). Dans le second exemple (Figure 4.20), la zone tampon a un diamètre de 100 m, puisqu'il s'agit d'un skieur seul évoluant à la montée par bonne visibilité. Si nous avons évoqué précédemment un diamètre de 15 m (également par bonne visibilité), la différence entre les deux situations vient cette fois de la configuration du terrain : il s'agit ici d'une large pente tandis que le cas précédent (Figure 4.18) correspondait à une croupe bien dégagée minimisant les risques de s'écarter de la trace envisagée.

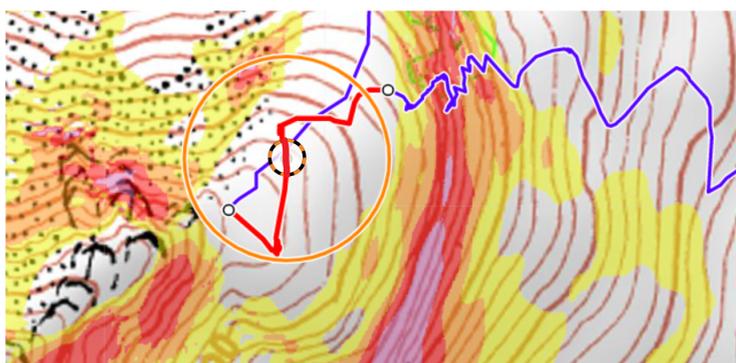
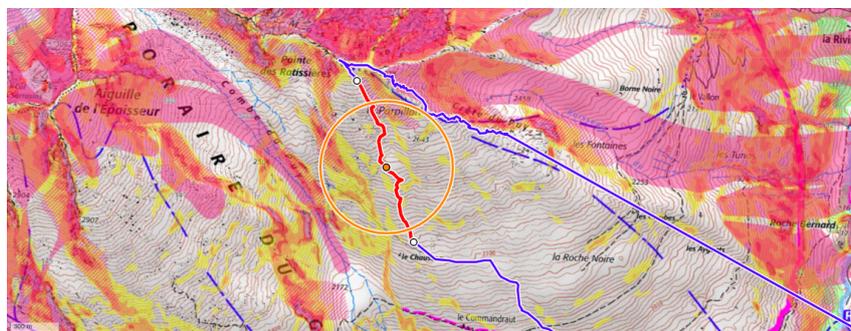


Figure 4.18 – Illustration de la taille de la zone tampon (orange) sur un itinéraire précis

Analysons plus en détail ces deux exemples (Figures 4.19 et 4.20) du point de vue du critère C2 *Inclinaison des pentes*, le seul des cinq critères que l'on peut étudier sur la base d'une carte. Dans le premier exemple, si le skieur suit rigoureusement l'itinéraire indiqué, il ne fréquente directement aucune pente d'inclinaison supérieure à  $30^\circ$  (représentées en jaune sur la carte). En revanche, s'il s'en éloigne, il intersecte rapidement les pentes d'inclinaison supérieure à  $30^\circ$ . Ceci induit donc la différence obtenue sur le sous critère C2.2 *Pentes fréquentées*, visible dans les tableaux de la Figure 4.19b, ainsi que la différence résultant sur l'estimation du critère C2 *Incli-*



(a) Carte de présentation du secteur. Tracé bleu : itinéraire global ; Tracé rouge : tronçon homogène considéré pour l'évaluation du mode de vigilance

Sous-critères							C2 Pentes fréquentées
C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6	C2.7	
✓ 12	12	12	12	12	12	12	12
0	0	0	6	0	6	6	6
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
0	0	0	0	0	0	0	0

Sous-critères – Zone tampon							C2 Pentes fréquentées Zone tampon
C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6	C2.7	
✓ 12	✓ 12	12	12	12	12	12	12
0	0	0	6	0	6	6	6
						✓	✓
0	0	0	0	0	0	0	0

(b) Double évaluation du critère C2 Inclinaison des pentes

Critères					Mode de vigilance
C2	C3	C4	C5	C6	
12	12	12	12	12	Hasardeux
6	8	6	6	8	Alerté
✓	✓	✓	✓	✓	Méfiant
0	0	0	0	0	Détendu

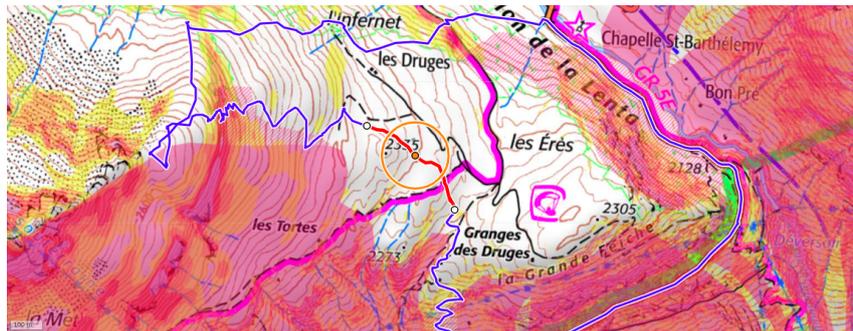
Critères – Zone tampon					Mode de vigilance Zone tampon
C2	C3	C4	C5	C6	
12	12	12	12	12	Hasardeux
6	8	6	6	8	Alerté
✓	✓	✓	✓	✓	Méfiant
0	0	0	0	0	Détendu

(c) Double évaluation des modes de vigilance

Figure 4.19 – Exemple 1 : Pointe des Ratissières le 30 décembre 2020

*naison des pentes* (respectivement 0 - *Situation sûre* et 6 - *Situation incertaine*). Cette différence impacte la valeur du mode de vigilance obtenu en sortie : il vaut *Détendu* localement et *Alerté* dans la zone tampon (Figure 4.19c). Au final, le fait d'obtenir *ici* (i.e., pour l'évaluation locale) le mode *Détendu* et *là-bas* (i.e., pour l'évaluation à distance) le mode *Alerté* conduit, en résultante, à l'attribution du mode de vigilance *Méfiant* pour le tronçon évalué (voir l'agrégation de niveau  $n + 1$  présentée ci-dessous.)

Dans le second exemple, l'estimation de l'ensemble des critères est la même localement comme à distance. Sur la carte, on voit en effet que sous l'itinéraire du skieur comme dans l'ensemble de la zone tampon, aucune pente n'est d'inclinaison supérieure à 30° donc considérée comme avalancheuse. L'estimation du critère C2 *Inclinaison des pentes* vaut donc 0 - *Situation sûre* dans les deux cas et le mode de vigilance reste fixé à *Détendu* (Figure 4.20b) et le mode de vigilance final qui en résulte reste alors fixé à *Détendu*.



(a) Carte de présentation du secteur. Tracé bleu : itinéraire global ; Tracé rouge : tronçon homogène considéré pour l'évaluation du mode de vigilance

Critères					Mode de vigilance
C2	C3	C4	C5	C6	
12	✓ 12	12	12	12	Hasardeux
6	8	6	✓ 6	✓ 8	Alerté
✓ 0	4	✓ 0	0	4	Méfiant
0	0	0	0	0	✓ Détendu

Critères - Zone tampon					Mode de vigilance Zone tampon
C2	C3	C4	C5	C6	
12	✓ 12	12	12	12	Hasardeux
6	8	6	✓ 6	✓ 8	Alerté
✓ 0	4	✓ 0	0	4	Méfiant
0	0	0	0	0	✓ Détendu

(b) Double évaluation des modes de vigilance

Figure 4.20 – Exemple 2 : Bonneval sur Arc secteur de La Met le 18 décembre 2020

Comme illustré dans l'exemple précédent (voir Tableau 4.2 et Figure 4.19), cette double évaluation s'avère notamment utile dans le cas du critère C2 *Inclinaison des pentes* qui peut varier rapidement et être évalué "ici" comme "là-bas". Pour citer un autre critère pouvant différer, si la pente est constante et partout supérieure à 30°, le critère C6 *Couche fragile enfouie* est lui aussi susceptible de varier. Il se peut en effet qu'il n'y ait pas de couche fragile *ici* mais qu'il y en ait *là-bas*, dans tous les secteurs ventés à venir. Dans l'évaluation de la zone tampon, ce sera alors le paramètre C6 qui sera augmenté à distance par rapport à l'évaluation locale, et qui peut faire varier l'évaluation finale du mode de vigilance. Cette variation des valeurs prises par les critères localement et à distance est bien sûr aussi possible sur les critères C4 *Augmentation de température, fonte* (du fait de changements d'orientations des pentes) et C5 *Surcharges nouvelles* (du fait

d'accumulation locale par le vent).

Ainsi, avant cette phase de test et d'amélioration continue, le système n'était pas en mesure de capturer la notion d'anticipation du danger à venir, pourtant bien présente dans l'expertise et la définition même des modes de vigilance de la démarche CRISTAL. Avec la prise en compte de la zone tampon, et cette double évaluation, le système permet désormais la transition entre les modes *Détendu* et *Méfiant*. Ainsi, aucune règle du niveau d'agrégation  $n$  ne permet d'obtenir le mode de vigilance *Méfiant*. Celui-ci est obtenu si et seulement si l'évaluation, locale, conduit au mode de vigilance *Détendu* et que l'évaluation à distance, dans la zone tampon, indique que les modes de vigilance *Alerté* ou *Hasardeux* seront requis si le skieur s'éloigne légèrement de l'itinéraire envisagé. L'obtention des modes de vigilance *Alerté* ou *Hasardeux* en périphérie de la zone tampon renseigne en effet sur le fait qu'une avalanche si elle n'est pas possible *ici* est possible *là-bas*. En se plaçant dans le mode de vigilance *Méfiant*, l'utilisateur conserve donc un niveau de vigilance minimal lui permettant de ne pas quitter la zone non-impactée par un danger et ne pas se faire surprendre par les dangers associées aux secteurs alentours. Ainsi, c'est le déplacement du (ou des) skieur(s) qui est pris en compte à travers l'aspect statique ou dynamique du groupe : sans déplacement, le skieur reste en mode *Détendu* ; en mouvement, le skieur entre dans le mode *Méfiant*.

Cette première phase de mise en confrontation des modes de vigilance expertisés et obtenus par le système a donc permis d'explicitier et intégrer dans le système un élément permettant le passage du mode de vigilance *Détendu* au mode de vigilance *Méfiant*. Si l'expert le prenait en considération de façon naturelle et intuitive lors d'analyse de cas concrets, la phase de test a permis de le révéler et en prendre conscience afin de l'intégrer dans le système.

Par conséquent, du fait de la double évaluation du mode de vigilance (local et dans la zone tampon), un niveau d'agrégation supplémentaire est nécessaire pour obtenir le mode de vigilance final à communiquer à l'utilisateur pour la situation donnée. Comme mentionné, pour chacune des deux évaluations, seuls les modes *Détendu*, *Alerté* et *Hasardeux* peuvent être obtenus. C'est à l'issue de l'agrégation de niveau  $n+1$  que les quatre modes de vigilance sont susceptibles d'être communiqués.

Notons  $MV_1$  le mode de vigilance obtenu localement,  $MV_2$  le mode de vigilance obtenu dans la zone tampon, à distance et  $MV_f$  le mode de vigilance final. Les règles de l'agrégation de niveau  $n+1$  sont alors les suivantes :

Règle finale 1 :

```
IF  $MV_1$  IS Detendu AND
   $MV_2$  IS Detendu
THEN  $MV_f$  IS Detendu
```

Règle finale 2 :

```
IF  $MV_1$  IS Detendu AND
  ( $MV_2$  IS Alerte OR  $MV_2$  IS Hasardeux)
THEN  $MV_f$  IS Mefiant
```

Règle finale 3 :

```
IF  $MV_1$  IS Alerte
THEN  $MV_f$  IS Alerte
```

Règle finale 4 :

```
IF  $MV_1$  IS Hasardeux
THEN  $MV_f$  IS Hasardeux
```

### **Besoin de prendre en compte la *Surface mobilisable***

En testant d'autres cas concrets, comme celui illustré par le Tableau 4.3, nous avons identifié que le système ne permettait pas de capturer la véritable différence entre les modes de vigilance *Alerté* et *Hasardeux*.

C2	C3	C4	C5	C6	Mode de vigilance (expert)	Mode de vigilance (système)
12	8	0	6	12	Alerté	Hasardeux

C2 *Inclinaison des pentes*, C3 *Observations d'avalanches récentes*, C4 *Augmentation de température, fonte*, C5 *Surcharges nouvelles*, C6 *Couche fragile enfouie*.

Tableau 4.3 – Comparaison des modes de vigilance estimés par un expert et par le système à proximité de la Pointe des Ratissières le 30 décembre 2020

Dans cet exemple, on peut se demander pourquoi l'expert est en mode *Alerté* tandis que le système donne le mode de vigilance *Hasardeux* en sortie. Au vu des valeurs expertes attribuées aux différents critères, il est vrai qu'une avalanche est possible *ici*. Par contre, nous ne pouvons pas savoir si elle mobilisera ou non une grande surface, donc être de grande ampleur. Cette nuance caractérise pourtant la différence entre les modes de vigilance *Alerté* (avalanche possible *ici*) et *Hasardeux* (avalanche de grande ampleur possible *ici*), voir Figure 4.1. Il s'agit, dans les faits, pour caractériser la différence entre ces deux modes de vigilance, d'estimer si une avalanche potentielle pourrait mobiliser une grande surface (donc être de grande ampleur) ou non du fait de la configuration du terrain. En effet, même pour des conditions nivo-météorologiques particulièrement critiques, toutes les pentes ne sont pas capables de mobiliser des grandes surfaces et donc générer des avalanches de grande ampleur. La différence entre les modes de vigilance *Alerté* et *Hasardeux* doit donc être principalement régie par la dimension de la pente d'inclinaison supérieure à 30° et sa capacité à produire ou non des avalanches de grande ampleur.

Notons qu'avant cette phase de test et d'amélioration continue, attribuer une valeur 12 - *Situation dangereuse* au critère C2 *Inclinaison des pentes* signifie soit que les pentes fréquentées sont d'inclinaison supérieure à 30° (cas de l'exemple exploité, voir Figure 4.21), soit que les pentes en aval peuvent emporter le skieur, soit encore que les pentes en amont peuvent l'atteindre en cas de déclenchement. Le skieur peut donc être emporté par une avalanche là où il se trouve, ce qui correspond aux définitions des deux modes de vigilance *Alerté* et *Hasardeux*. Cependant, cette évaluation ne permet pas de capturer l'ampleur (du fait du terrain) d'une potentielle avalanche. Pour cette raison, l'analyse de cas concrets nous a permis de déduire qu'un sous-critère supplémentaire doit être pris en compte sur le critère C2 *Inclinaison des pentes*. Ainsi, l'ajout du sous-critère C2.7 *Surface mobilisable* permet de gérer l'obtention d'un mode de vigilance *Alerté* ou *Hasardeux* en fonction de la situation ; il assure donc la transition entre ces deux modes de vigilance. Le sous-critère C2.7 *Surface mobilisable* peut prendre les trois valeurs suivantes *Nulle* (uniquement dans le cas où les pentes ne sont pas considérées comme avalancheuses, i.e., si et seulement si aucune pente n'est d'inclinaison supérieure à 30° et inférieure à 65°), *Faible* ou *Grande*.

Avec la prise en compte de ce sous-critère supplémentaire, les valeurs 0 - *Situation sûre*, 6 - *Situation incertaine* et 12 - *Situation dangereuse* associées au critère C2 *Inclinaison des pentes* (voir Section 4.2.1) prennent une nouvelle signification. Le sous-critère C2.7 permet de compléter les informations, désormais, une pente dangereuse (i.e., avalancheuse, pouvant emporter le skieur) ne sera pas considérée comme telle si la surface mobilisable est faible. Elle prendra alors au maximum la valeur 6 - *Situation incertaine*. Par conséquent, cette valeur ne correspond plus seulement aux pentes caractérisées comme incertaines. Elle caractérise aussi une situation potentiellement dangereuse mais dont l'estimation de la dangerosité est réduite du fait d'une faible ampleur potentielle de l'avalanche maximale que la pente est en mesure de générer. Ainsi, une pente sera considérée comme véritablement dangereuse (i.e., 12 - *Situation dangereuse*) seulement dans le cas où la surface mobilisable est grande. À l'issue de cette phase d'amélioration continue, les valeurs prises par le critère C2 *Inclinaison des pentes* signifient désormais :

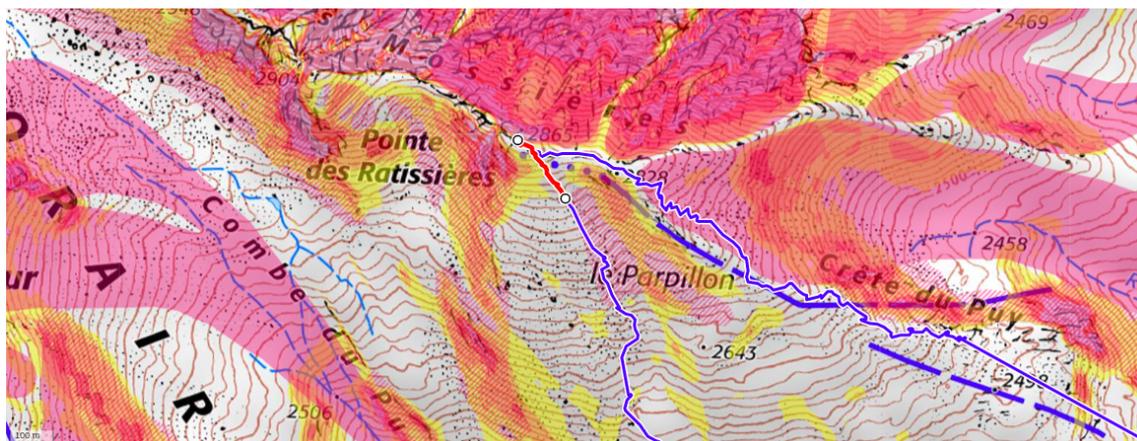


Figure 4.21 – Portion d'itinéraire associée à un mode de vigilance *Alerté* du fait de la prise en compte du sous-critère C2.7 dans l'analyse

- 0 - Situation sûre,
- 6 - Situation incertaine ou évaluée comme dangereuse mais dont l'avalanche maximale potentielle est de faible ampleur,
- 12 - Situation dangereuse et dont l'avalanche maximale potentielle est de grande ampleur.

La prise en compte du sous-critère C2.7 *Surface mobilisable* a un effet sur la signification des valeurs du critère C2 *Inclinaison des pentes*. Cet effet se répercute ensuite sur le mode de vigilance obtenu. Ainsi, dans le système, le critère C2 *Inclinaison des pentes* ne prend la valeur 12 - *Situation dangereuse* que dans le cas où la valeur prise par le sous-critère C2.7 est *Grande*. Le mode de vigilance *Hasardeux* ne peut alors être obtenu lorsque le critère C2 *Inclinaison des pentes* vaut 12 - *Situation dangereuse*. Cela permet de capturer dans le système la différence qui réside entre les deux modes de vigilance *Alerté* et *Hasardeux*, ce dernier correspondant au risque de rencontrer une avalanche de grande ampleur. Dans les autres cas, le mode de vigilance obtenu pourra être fixé au maximum à *Alerté*. Ainsi, c'est la notion de *spatialité* qui régit le passage entre les modes *Alerté* et *Hasardeux*. Dans les deux cas, l'avalanche est possible au niveau de l'itinéraire du skieur. Dans le premier cas (*Alerté*) elle reste de petite dimension, ce qui permet une réduction du risque ; dans le second cas (*Hasardeux*), son étendue est trop importante, rendant la situation hasardeuse, sans possibilité de réduire le risque.

Par conséquent, dans l'exemple présenté ci-dessus et bien que cela ne soit pas capturé par un élément du système, l'expert considèrerait dans son analyse que les pentes sont en mesure de ne gérer, au maximum, que des avalanches de faibles ampleur. C'est pourquoi il ne lui associait pas le mode de vigilance *Hasardeux*. En exploitant le système avec ces nouveaux apports, on vérifie désormais que le fait d'attribuer la valeur *Faible* au sous-critère C2.7 permet au système d'obtenir la valeur 6 - *Situation incertaine* pour le critère C2 (par opposition à la valeur 12 préalablement établie, voir Tableau 4.3) et, par effet de chaîne, le mode de vigilance *Alerté*. Ainsi, à l'issue de cette étape d'amélioration continue, le système retourne bien, comme l'expert, un mode de vigilance *Alerté*.

Enfin, nous pouvons noter que la fuzzification du sous-critère C2.7 *Surface mobilisable* est à déterminer. Nous avons en effet ajouté la prise en compte théorique de ce sous-critère, la caractérisation d'une faible ou grande surface mobilisable (générant donc des avalanches de plus ou moins grande ampleur) restant à développer. Si nous pouvons supposer que sa définition sera très proche de celle du sous-paramètre C3.1<sub>3,1</sub> *Largeur pente* du critère C3 *Observations d'avalanches récentes*, sa fuzzification pourra être dégagée de l'interrogation d'un expert sur de nombreux cas pour voir ses limites entre les deux modes et analyser les caractéristiques des pentes associées à chaque cas.

### 4.3.3 Validation du système global

Dans cette section, nous proposons une première phase de validation des règles développées. Elle est basée sur la comparaison entre l'évaluation de situations concrètes par un expert et les résultats donnés par le système pour ces mêmes situations. Nous estimons ainsi le taux de bonne estimation réalisée par le système global pour les niveaux de combinaison  $n$  et  $n-1$  dans le cas du critère C2 *Inclinaison des pentes*, niveaux pour lesquels les règles de combinaison exploitées par le système ont été développées (voir Section 4.2).

Ainsi, nous proposons, d'une part, une validation des règles de combinaison permettant de passer des critères aux modes de vigilance (niveau  $n$ ) et, d'autre part, des règles permettant de passer des sous-critères au critère C2 *Inclinaison des pentes*. Dans le premier cas, nous exploitons les valeurs expertes attribuées aux cinq critères et analysons dans quelle mesure le système, à travers la base de règles qu'il exploite, évalue le mode de vigilance approprié à la situation. Dans le second cas, nous procédons de même à partir des valeurs expertes des sept sous-critères.

Nous disposons de 17 cas concrets analysés par un expert à partir desquels nous réalisons cette première phase de validation des règles de combinaison du système. Ces 17 cas concrets sont extraits de trois itinéraires de ski de randonnée parcourus au cours de l'hiver 2020-2021, chacun décomposé en tronçons homogènes (au sens même mode de vigilance sur tout le tronçon) (voir Figure 4.22). Les situations 1 à 3 ont été enregistrées à proximité de la Tête du Torraz (à la Giettaz) (voir Figure 4.22a), les situations 4 à 13 proviennent d'un itinéraire proche de la Pointe de la Met (voir Figure 4.22b) et les situations 14 à 17 sont issues d'une sortie à la Pointe des Ratissières (voir Figure 4.22c). Pour chaque situation nous disposons :

- de la connaissance experte du mode de vigilance adapté à la situation,
- des valeurs expertes des cinq critères (à combiner pour l'obtention du mode de vigilance),
- des valeurs experts des sept sous-critères (à combiner pour l'obtention du critère C2 *Inclinaison des pentes*).

Nous disposons des informations évaluées localement ainsi que dans la zone tampon lorsque le mode *Détendu* est obtenu localement. Dans les Tableaux 4.4 et 4.5, les situations prenant en compte une évaluation dans la zone tampon sont développées sur deux lignes. La colonne MV donne le mode de vigilance associé à chaque ligne ; la colonne MV<sub>f</sub> renseigne le mode final résultant de l'agrégation de niveau  $n+1$ .

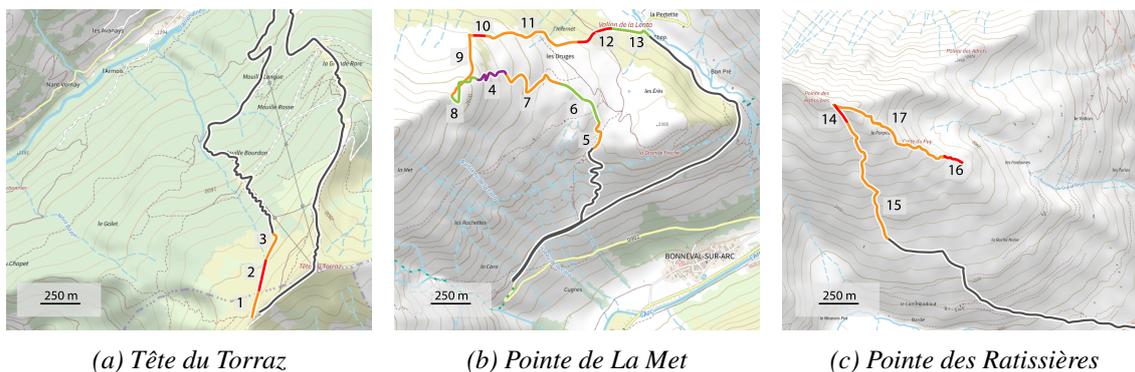


Figure 4.22 – 17 situations extraites de trois itinéraires de ski de randonnée

#### Validation des règles des niveaux $n$ et $n+1$

Le Tableau 4.4 propose une première validation des règles des niveaux de combinaison  $n$  et  $n+1$ , à travers les 17 cas analysés.

	Expert						Système		
	C2	C3	C4	C5	C6	MV	MV <sub>f</sub>	MV	MV <sub>f</sub>
<b>Situation 1</b>	0	8	6	6	4	Détendu	Méfiant	Détendu	Méfiant
	6	8	6	6	4	Alerté		Alerté	
<b>Situation 2</b>	6	8	6	6	4	Alerté	Alerté	Alerté	Alerté
<b>Situation 3</b>	0	8	6	6	4	Détendu	Méfiant	Détendu	Méfiant
	6	8	6	6	4	Alerté		Alerté	
<b>Situation 4</b>	12	12	0	6	8	Hasardeux	Hasardeux	Hasardeux	Hasardeux
<b>Situation 5</b>	0	12	0	6	8	Détendu	Méfiant	Détendu	Méfiant
	6	12	0	6	8	Alerté		Alerté	
<b>Situation 6</b>	0	12	0	6	8	Détendu	Détendu	Détendu	Détendu
	0	12	0	6	8	Détendu		Détendu	
<b>Situation 7</b>	0	12	0	6	8	Détendu	Méfiant	Détendu	Méfiant
	12	12	0	6	8	Hasardeux		Hasardeux	
<b>Situation 8</b>	0	12	0	6	8	Détendu	Détendu	Détendu	Détendu
	0	12	0	6	8	Détendu		Détendu	
<b>Situation 9</b>	0	12	0	6	8	Détendu	Méfiant	Détendu	Méfiant
	6	12	0	6	8	Alerté		Alerté	
<b>Situation 10</b>	6	12	0	6	8	Alerté	Alerté	Alerté	Alerté
<b>Situation 11</b>	0	12	0	6	8	Détendu	Méfiant	Détendu	Méfiant
	6	12	0	6	8	Alerté		Alerté	
<b>Situation 12</b>	6	12	0	6	8	Alerté	Alerté	Alerté	Alerté
<b>Situation 13</b>	0	12	0	6	8	Détendu	Détendu	Détendu	Détendu
	0	12	0	6	8	Détendu		Détendu	
<b>Situation 14</b>	6	8	0	6	12	Alerté	Alerté	Alerté	Alerté
<b>Situation 15</b>	0	8	0	6	12	Détendu	Méfiant	Détendu	Méfiant
	6	8	0	6	12	Alerté		Alerté	
<b>Situation 16</b>	6	8	0	6	12	Alerté	Alerté	Alerté	Alerté
<b>Situation 17</b>	0	8	0	6	12	Détendu	Méfiant	Détendu	Méfiant
	6	8	0	6	12	Alerté		Alerté	

C2 Inclinaison des pentes, C3 Observations d'avalanches récentes, C4 Augmentation de température, fonte, C5 Surcharges nouvelles, C6 Couche fragile enfouie.

MV : Mode de vigilance

Tableau 4.4 – Comparaison des modes de vigilance estimés par un expert et par le système pour 17 situations de validation

Pour chacune des 17 situations, le mode de vigilance final obtenu par le système est identique au mode de vigilance final issu de l'évaluation experte. Pour le niveau  $n+1$ , le système donne donc un résultat valide dans 100% des cas analysés.

Pour ces 17 situations, 28 combinaisons ont été testées (puisque 11 situations nécessitent une évaluation locale et dans la zone tampon). En partant des valeurs attribuées par l'expert sur chacun des cinq critères, le système a retourné, pour l'ensemble des combinaisons, un résultat égal au mode de vigilance évalué par l'expert. Ainsi, pour le niveau  $n$ , le système donne un résultat valide dans 100% des cas analysés.

Notons cependant que parmi les 28 combinaisons, seules 7 combinaisons distinctes sont obtenues. En effet, puisque les situations sont tirées de seulement trois sorties de ski de randonnées différentes, nous pouvons remarquer que les critères C3 à C6 sont constants pour une sortie donnée, réduisant donc le nombre de combinaisons testées. Pour cette première phase de validation, 7 combinaisons différentes sur les 430 ont donc fait l'objet de tests. Ces 7 combinaisons ont activé 5 règles différentes. Ainsi, seules 5 règles sur les 29 règles de combinaison du niveau  $n$  ont donc été confrontées à cette étape de validation. Si l'on se base sur le nombre de combinaisons testées, seulement 1,6% du niveau  $n$  a été soumis à la phase de validation ; si l'on se base sur le nombre de règles testées, 17,2% du niveau  $n$  a été soumis à la phase de validation

Pour résumer, seule une partie du niveau  $n$  a été soumise à la validation. Cependant, si toutes les combinaisons et toutes les règles n'ont pas pu être testées, toutes les valeurs de sorties possibles ont été obtenues. Cette première phase de validation souligne donc le fait que le système est en mesure de présenter une certaine efficacité, quel que soit le mode de vigilance attendu en sortie.

Si les premiers résultats obtenus lors de cette phase de test sont prometteurs, une importante partie du système reste à tester. La phase de validation nécessite donc une étude plus large, à conduire à la fois sur des données historiques (via l'analyse d'accidents passés bien documentés) et sur plusieurs saisons de tests sur le terrain. L'objectif de la validation complète sera de couvrir le plus grand nombre de combinaisons possibles sur lesquelles confronter l'évaluation experte au résultat du système. Cette prochaine phase de validation permettra de poursuivre l'amélioration du système puis confirmer sa validité.

### Validation des règles de niveau $n-1$

La Tableau 4.5 propose une première validation des règles de niveau de combinaison  $n-1$  portant sur le critère C2 *Inclinaison des pentes* développé dans ces travaux.

Pour présenter les combinaisons de façon plus lisibles et pouvoir comparer plus aisément les différentes lignes du tableau, nous avons utilisé la notation de type 0-12, 0-6-12 ou 0-4-8-12 pour exprimer les deux, trois ou quatre valeurs graduelles présentées en Section 4.2.2 que peuvent prendre les différents sous-critères.

La valeur attribuée au critère C2 par le système est la même que la valeur experte dans 27 combinaisons sur les 28 étudiées (la deuxième combinaison de la situation 13 est invalidée par le système). Pour le niveau  $n-1$ , le système donne donc un résultat valide dans 96,4% des cas analysés. Sur ces 28 combinaisons, nous disposons de 12 combinaisons différentes. Pour cette première phase de validation, 12 combinaisons différentes sur les 66 ont donc fait l'objet de tests. Bien sûr, cela conduit donc à analyser certaines combinaisons plusieurs fois, dans le cadre des différentes situations.

Ces 12 combinaisons activent 10 règles différentes sur les 24 existantes pour ce niveau. Ainsi 10 règles ont donc été confrontées à cette étape de validation portant sur le niveau  $n-1$ . Si l'on se base sur le nombre de combinaisons testées, 18,2% du niveau  $n-1$  a été soumis à la phase de validation ; si l'on se base sur le nombre de règles testées, 41,7% du niveau  $n-1$  a été soumis à la phase de validation. Ces chiffres sont plus élevés qu'en ce qui concerne le niveau  $n$ , mais une phase de test plus complète reste nécessaire.

Notons que l'exploitation du système de bout en bout conduirait à transférer l'erreur réalisée

	Expert							Système	
	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6	C2.7	C2	C2
<b>Situation 1</b>	0	0	0	0	12	0	6	0	0
	12	0	12	6	0	0	6	6	6
<b>Situation 2</b>	0	0	12	6	0	0	6	6	6
<b>Situation 3</b>	0	0	12	0	0	0	6	0	0
	0	0	12	6	0	0	6	6	6
<b>Situation 4</b>	12	12	/	/	/	/	12	12	12
<b>Situation 5</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	12	/	/	/	/	6	6	6
<b>Situation 6</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Situation 7</b>	0	0	12	0	0	0	6	0	0
	12	0	12	12	0	0	12	12	12
<b>Situation 8</b>	12	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Situation 9</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	12	/	/	/	/	6	6	6
<b>Situation 10</b>	12	12	/	/	/	/	6	6	6
<b>Situation 11</b>	0	0	0	0	12	0	6	0	0
	0	12	/	/	/	/	6	6	6
<b>Situation 12</b>	0	12	/	/	/	/	6	6	6
<b>Situation 13</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	0	12	0	0	0	6	0	6
<b>Situation 14</b>	12	12	/	/	/	/	6	6	6
<b>Situation 15</b>	12	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	12	/	/	/	/	6	6	6
<b>Situation 16</b>	0	0	0	0	12	6	6	6	6
<b>Situation 17</b>	0	0	0	0	12	0	6	0	0
	12	12	/	/	/	/	6	6	6

C2.1 CLPA, C2.2 Pentés fréquentées, C2.3 Pentés en amont, C2.4 Peut atteindre le skieur, C2.5 Pentés en aval, C2.6 Peut emporter le skieur, C2.7 Surface mobilisable.  
C2 Inclinaison des pentés

Tableau 4.5 – Comparaison des valeurs de C2 estimées par un expert et par le système pour 17 situations de validation

par le système lors du niveau  $n-1$  aux niveaux suivants. Quel serait alors l'impact de la situation estimée de façon erronée par le système (par rapport à l'évaluation experte), sur le mode de vigilance (i.e., résultat du niveau  $n$ ) et sur le mode de vigilance final (i.e., résultat du niveau  $n+1$ ) ? Ce cas est étudié dans le Tableau 4.6, où les modes de vigilance sont analysés non plus seulement à partir des valeurs expertes attribuées aux cinq critères, mais aussi à partir de la valeur automatique obtenue par le système pour le critère C2 *Inclinaison des pentes*. Cela permet d'illustrer le transfert de l'erreur réalisée au niveau  $n-1$  sur les niveaux suivants. La situation 13 conduit, à l'issue du niveau  $n$  illustré dans le tableau, à un mode de vigilance *Alerté* au lieu de *Détendu*. Ce dernier étant affecté à l'évaluation de la zone tampon, le mode de vigilance final qui en résulte (à l'issue du niveau  $n+1$ ) est donc *Méfiant* au lieu de *Détendu*. Cette situation illustre donc que l'erreur se répand à travers les niveaux successifs de combinaison et impacte la valeur de sortie.

		C2	C3	C4	C5	C6	MV (expert)	MV (système)
<b>Situation 13</b> <b>(zone tampon)</b>	Expert	0	12	0	6	8	Détendu	Détendu
	Système	6					/	Alerté

Tableau 4.6 – Effet de l'estimation invalide de C2 par le système sur le mode de vigilance

Puisque les erreurs se répandent dans le système jusqu'au résultat lorsqu'il est exploité de façon automatique, il est nécessaire de proposer aux utilisateurs une phase de correction possible d'éventuelles erreurs, donc de réévaluation des valeurs attribuées aux différents éléments combinés (critères, sous-critères, paramètres, etc.). Ceci se fait lors d'une deuxième itération du système et est permise par l'étape d'explication du résultat. Cette étape est visible sur le schéma global du système de fusion d'informations développé, donné en Figure 4.4, ainsi que sur la Figure 4.23 présentant les étapes successives du système de fusion d'informations relatives à un seul niveau d'agrégation. L'étape d'explication et son intérêt dans le système pour l'utilisateur sont explicités dans la section suivante. Elle est illustrée en particulier grâce au cas de la Situation 13.

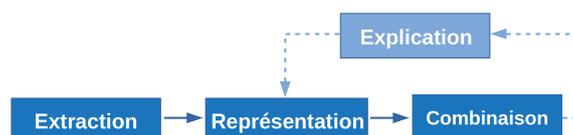


Figure 4.23 – Étapes d'un niveau d'agrégation du système de fusion d'informations développé

### Étape d'explication et réitération du système

L'étape d'explication du résultat ainsi que la boucle de rétroaction qu'elle induit permettent une seconde évaluation et d'éventuelles corrections apportées par l'utilisateur. Cette boucle de rétroaction contribue à apporter de la flexibilité à la méthode, caractéristique faisant partie des recommandations données au Chapitre 1.

L'explication du résultat se fait de la manière suivante : à l'issue de l'évaluation, le système de fusion est en mesure de communiquer la (ou les) règle(s) qui a été activée (règle du niveau  $n$ ). À partir de cette règle, l'utilisateur a alors accès aux sous-critères auxquels elle fait appel (tous les sous-critères propres à un critère n'étant pas systématiquement appelés dans toutes les règles). L'utilisateur peut alors soit agir sur les valeurs données à ces sous-critères, soit réitérer cette étape d'explication sur l'un ou l'autre des sous-critères. Dans ce cas, la (ou les) règle(s) qui a été exploitée est communiquée à l'utilisateur et celui-ci peut agir sur les valeurs attribuées aux paramètres concernés et ainsi de suite sur les différents niveaux préalables.

Prenons l'exemple de la situation 13 précédemment détaillée. Dans cet exemple, l'évaluation automatique réalisée par le système donne la combinaison présentée en Figure 4.24. L'évaluation locale du critère C2 *Inclinaison des pentes* conduit à la valeur 0 - *Situation sûre* (Figure 4.24a) et le mode de vigilance obtenu est *Détendu* (Figure 4.24c). L'évaluation dans la zone tampon donne 6 - *Situation incertaine* pour le critère C2 (Figure 4.24b) et le mode de vigilance est *Alerté* (Figure 4.24d). Le résultat final est donc le mode de vigilance *Méfiant*.

Cette évaluation automatique avait été invalidée lorsque comparée à l'estimation experte de la même situation (voir Tableaux 4.5 et 4.6). L'erreur du système automatique réside dans l'évaluation du critère C2 *Inclinaison des pentes* de la zone tampon (elle entre donc dans le système au niveau  $n-1$ ) et se propage sur les modes de vigilance obtenus aux niveaux  $n$  puis  $n+1$ .

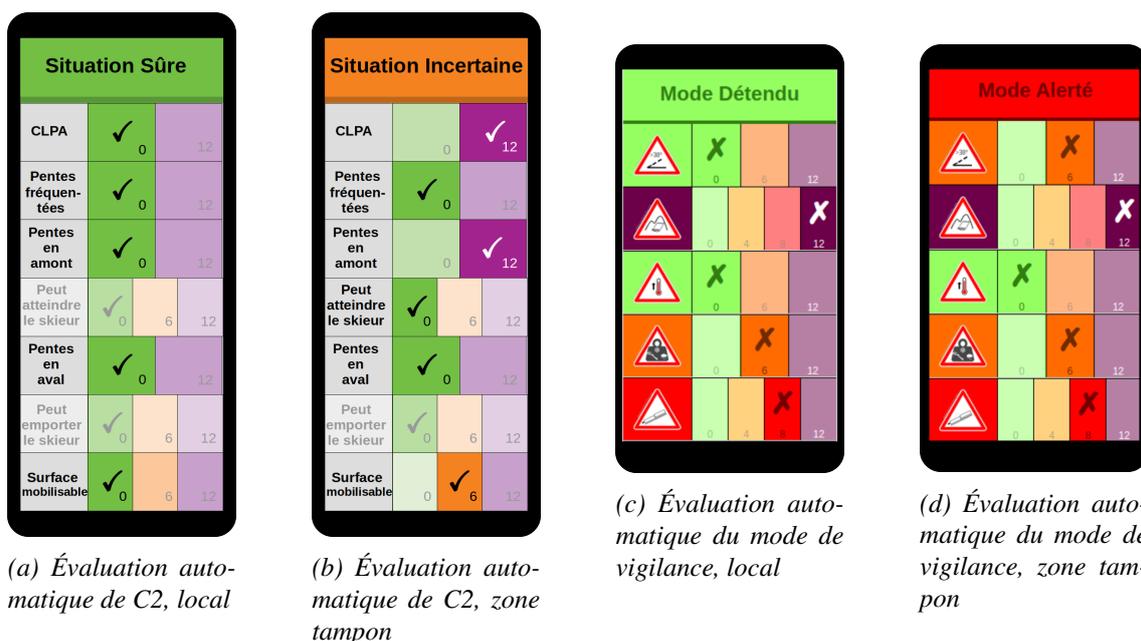


Figure 4.24 – Évaluation automatique de la Situation 13

Au niveau  $n$ , et sur la zone tampon, le critère prépondérant est le critère C2 *Inclinaison des pentes*; il est en effet le seul critère qui, si l'on modifie sa valeur en faveur de valeurs soit plus élevées soit plus faibles, a un effet sur le mode de vigilance obtenu. La modification de l'un des quatre autres critères, dans cette situation, conduit toujours au mode de vigilance *Alerté*. Pour l'évaluation du critère C2 *Inclinaison des pentes* de la zone tampon, la règle activée est la Règle 2-10 (voir Annexe D.2.1). En analysant cette règle, nous pouvons constater que la combinaison est intrinsèquement ambiguë. Elle exprime à la fois le fait que le skieur se trouve dans une zone pouvant être affectée par une avalanche (puisque C2.1 *CLPA* vaut *Oui*, ce qui signifie que le skieur peut intersecter une enveloppe d'avalanche CLPA) et le fait que le skieur ne puisse pas être atteint par une avalanche qui se déclencherait dans les pentes qui dominent son itinéraire (puisque C2.3 *Pentes en amont* vaut *Pentes avalancheuses* mais que C2.4 *Peut atteindre le skieur* vaut *Non (position sûre)*). Il y a dans ce cas deux explications possibles :

- soit la CLPA est fausse,
- soit le modèle statistique estimant si le skieur peut être atteint, sur la base de la distance d'arrêt des avalanches, atteint ses limites (ce qui peut correspondre à des cas particuliers s'éloignant du modèle, comme ceux évoqués au Chapitre 3, voir Figure 3.9).

Les sous-critères prépondérants sur cette règle sont donc les deux sous-critères C2.1 *CLPA* et C2.4 *Peut atteindre le skieur* qui sont en désaccord. L'un des deux a donc fait l'objet d'une erreur.

Ainsi, lors de la réitération du système, pour la seconde évaluation, l'utilisateur peut donc modifier la valeur de l'un ou l'autre de ces sous-critères pour avoir des valeurs cohérentes et valides avec la réalité. Dans cet exemple, il s'avère que la CLPA est erronée ; elle ne devrait pas être apparente sur la carte au niveau de la zone tampon puisque aucune pente à plus de 30° s'y trouve et aucune pente en amont ne menace cette zone (voir Figure 4.25). L'utilisateur peut donc corriger la valeur affectée au sous-critère C2.1 *CLPA* (voir Figure 4.26b par rapport à 4.24b), ce qu'a fait l'expert intuitivement, même s'il a renseigné la valeur 12 sur la base de la carte dans le Tableau 4.5. Cette modification a un effet sur la valeur obtenue pour le critère C2 *Inclinaison des pentes* ; il prend désormais la valeur 0 - *Situation sûre* (voir Figure 4.26b). *In fine*, le mode de vigilance obtenu pour la zone tampon vaut désormais *Détendu* (voir Figure 4.26d). Grâce à l'étape d'explication et la boucle de rétroaction qui s'en suit, les valeurs estimées par le système (valeurs de C2 et du mode de vigilance sur la zone tampon ainsi que du mode de vigilance final obtenu à l'issue du niveau  $n+1$ ) sont donc en accord avec l'évaluation experte de cette situation.

De ce fait, si le processus automatique donne dans cette situation le mode de vigilance *Alerté*, grâce à la flexibilité de la méthode, l'utilisateur peut corriger la valeur du sous-critère C2.1 *CLPA* puisqu'il estime ici qu'elle est fautive. Cette correction se répand alors dans le système et permet l'amélioration du résultat final obtenu. Ainsi, l'étape d'explication et la réévaluation de certains éléments (critères, sous-critères ou paramètres ; ici sous-critère) lors d'une seconde itération du système permet de corriger et améliorer le résultat communiqué, ce qui souligne l'importance de cette étape dans le système global et sur chaque niveau d'agrégation.

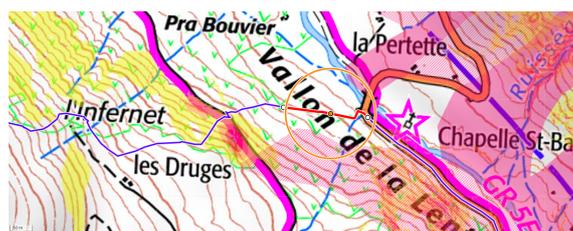


Figure 4.25 – Carte de présentation du tronçon d'itinéraire évalué en Situation 13 (rouge)

Notons que, dans l'exemple présenté, l'expert prenait en compte de façon intuitive cette erreur de valeur assignée au sous-critère C2.1 *CLPA*, même s'il a lui-même renseigné la valeur 12 signifiant *Yes* (voir Tableau 4.5). Une enveloppe CLPA est en effet présente sur la carte (en rose, Figure 4.25) et l'expert, même s'il l'a ignorée ensuite dans son évaluation, a fait l'erreur que le système automatique aurait faite (assigner 12 au sous-critère C2.1 *CLPA*). Cependant, dans son évaluation, l'expert a intuitivement corrigé cette erreur tandis que le système ne peut qu'appliquer les règles développées, sans influence externe. C'est l'étape d'explication du résultat obtenu, permettant la réévaluation et correction d'éventuelles erreurs préalables, qui permet de pallier à ce problème. Son rôle au sein du système global pour l'aide à la décision est donc essentiel pour l'utilisateur final.

D'autres exemples permettent de souligner l'intérêt de cette étape d'explication et de la rétroaction qui en découle, donnant de la flexibilité au système. Rappelons que lors de la première itération, le système développé renseignera à terme lui-même automatiquement et autant que possible la valeur prise par les différents éléments analysés. Lorsqu'il renseigne automatiquement la valeur d'inclinaison des différentes pentes, il ne peut que s'appuyer sur les valeurs du Modèle Numérique de Terrain (MNT). Cependant, il peut y avoir en réalité des différences d'inclinaison entre le MNT et le Modèle Numérique de Surface (MNS) qui correspond quant à lui, au cours de la saison hivernale, à la surface du manteau neigeux (SN, pour Surface Neige). De plus, les deux inclinaisons mesurées respectivement sur le MNT et le MNS peuvent toutes deux différer de l'inclinaison de la couche fragile, inclinaison qui fait pourtant réellement sens dans le cadre de

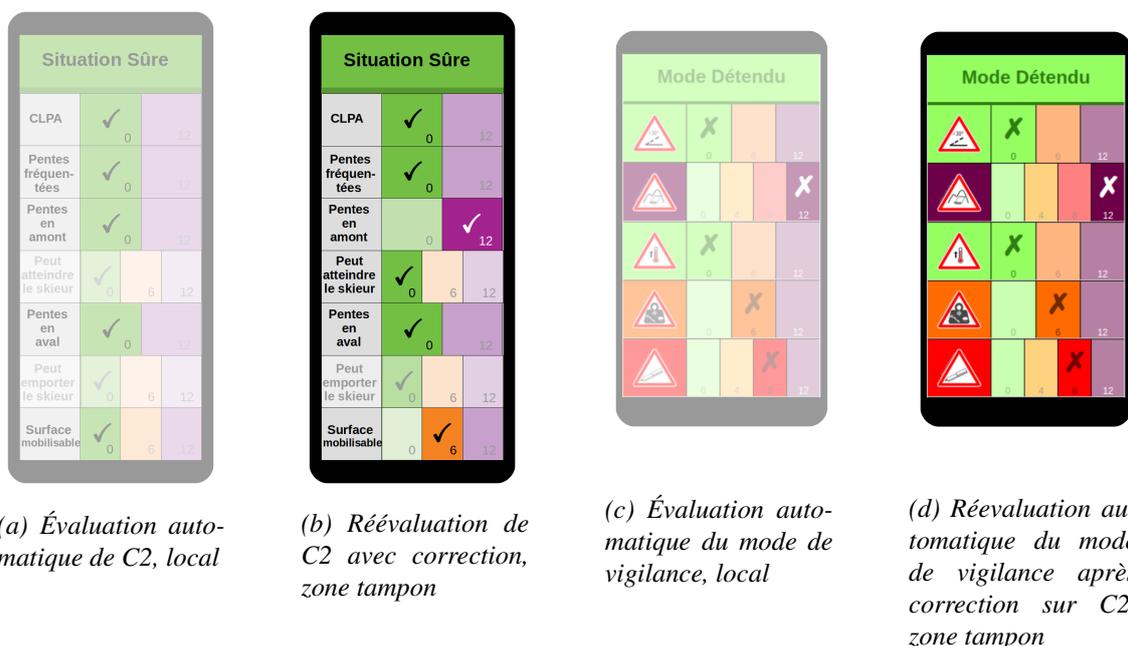
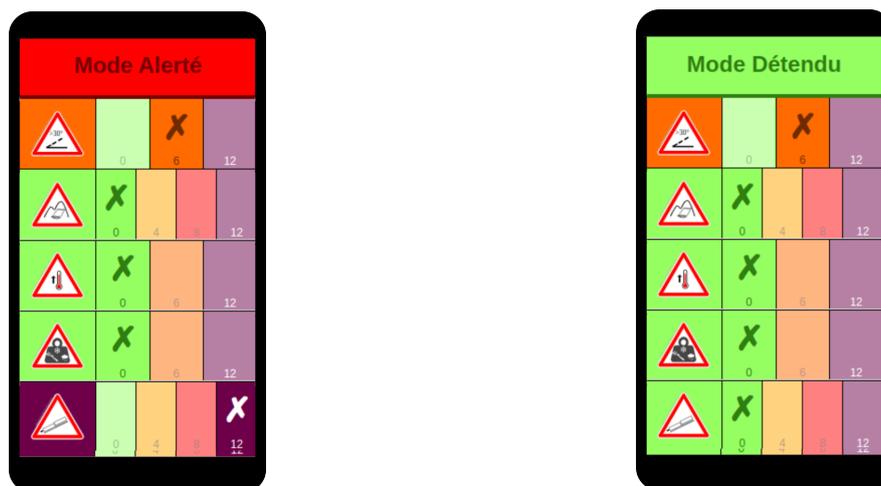


Figure 4.26 – Deuxième évaluation de la Situation 13

l'estimation du risque d'avalanche. Pour cette raison, l'utilisateur prudent devra renseigner dans le système la valeur la plus critique entre l'inclinaison donnée par le MNT et l'inclinaison de la SN. À distance, c'est-à-dire lors de la phase de pré-analyse à la maison, il ne disposera que de la valeur du MNT et sera dans l'incapacité d'agir ; cependant, sur le terrain, l'utilisateur peut mesurer la valeur d'inclinaison à la surface de la neige et la corriger si nécessaire.

Cet exemple souligne donc à nouveau l'intérêt de l'explication du résultat et d'une seconde évaluation du système (donc de la flexibilité de la méthode). Il prouve aussi que la méthode est utilisable dans plusieurs phases d'une sortie à ski (autre caractéristique identifiée dans les recommandations données au Chapitre 1) comme c'est le cas ici à distance en phase de préparation de course (avec accès à la valeur du MNT) et sur le terrain pour une seconde évaluation (où l'utilisateur dispose d'informations supplémentaires grâce à la mesure possible de l'inclinaison SN).

Un dernier exemple, qui porte sur l'évaluation du critère C6 *Couche fragile enfouie*, démontre à nouveau l'utilité de l'étape d'explication donnant de la flexibilité au système et son utilisation possible dans différentes phases d'une randonnée à ski. Dans cet exemple, la valeur automatiquement assignée au critère C6 vaut 12 du fait des résultats d'un test nivologique réalisé à proximité du secteur fréquenté par l'utilisateur et l'itinéraire envisagé par le skieur emprunte des pentes raides mais de petite ampleur (voir Figure 4.27a). L'étape d'explication indique que la règle activée est la Règle 9 (voir Annexe D.1). Dans cette règle et pour cette situation, les deux seuls critères qui interviennent sont C2 *Inclinaison des pentes* et C6 *Couche fragile enfouie*. Ici, il n'y a aucune ambiguïté sur la valeur 6 attribuée à C2, le skieur allant effectivement skier des pentes raides et de petite ampleur. Une éventuelle erreur peut résider sur le critère C6. Dans cet exemple, l'utilisateur, à son arrivée sur le terrain, identifie qu'une avalanche s'est préalablement déclenchée dans les pentes qu'il s'appête à skier. Il est donc en mesure de corriger la valeur 12 attribuée à C6 en renseignant la valeur 0, la couche fragile ayant déjà été désagrégée, provoquant ainsi une avalanche et la "purge" de la pente en question. Le système automatique, tout comme l'utilisateur en phase de préparation à la maison, est incapable d'identifier cette valeur correcte, i.e., celle qui fait réellement sens sur le terrain. Cependant, si la valeur de ce paramètre est importante, l'utilisateur, une



(a) Première évaluation du mode de vigilance

(b) Réévaluation du mode de vigilance avec correction

Figure 4.27 – Intérêt de l'étape d'explication et boucle de rétroaction sur l'évaluation du mode de vigilance

fois sur le terrain, ayant accès à davantage d'informations, est alors en mesure de la corriger dans le système, améliorant le résultat final qui lui est communiqué. Dans ce cas, le mode de vigilance passe de *Alerté* à *Détendu* et le skieur peut maintenir son projet. Cette réévaluation permise à l'utilisateur souligne le fait que la méthode d'aide à la décision ainsi développée est en accord avec le principe de la formule 3x3 (voir Chapitre 1 pour mémoire) à savoir le fait qu'il soit possible de réitérer l'évaluation dans les différentes phases d'une sortie à ski (en phase de préparation à la maison, à l'arrivée sur le terrain et aux passages clés, voir Figure 1.2 du Chapitre 1). Ceci permet donc une remise en question des premiers résultats obtenus au cours de la sortie. Ainsi, grâce à la boucle de rétroaction et au fait que l'utilisateur dispose d'informations de plus en plus précises à mesure qu'il est sur le terrain, ses premières estimations peuvent être corrigées, ce qui répond à l'un des besoins présenté au Chapitre 1.

Notons cependant que l'ensemble des explications n'est pas disponible à l'issue des travaux actuels. Par exemple, si l'explication renseigne la règle 2-14 du niveau  $n-1$  (voir Annexe D.2.1) comme prépondérante, alors l'utilisateur n'est pas en mesure de savoir si la menace provient des pentes en amont, des pentes en aval ou des deux à la fois. Dans ce cas, en ce qui concerne l'explicabilité, si cette règle est prépondérante dans le résultat final, alors il devient nécessaire de comparer les degrés d'appartenance à cette règle pour chacun des sous-critères. Sur la base d'un exemple net, cela signifie que :

- si nous avons 1 pour C2.3 *Pentes en amont* et 1 pour C2.5 *Pentes en aval*, alors ce sont à la fois les pentes au dessus et en dessous du skieur qui le menacent ;
- si nous avons 1 pour C2.3 *Pentes en amont* et 0 pour C2.5 *Pentes en aval*, alors ce sont uniquement les pentes au dessus du skieur qui constituent une menace ;
- si nous avons 0 pour C2.3 *Pentes en amont* et 1 pour C2.5 *Pentes en aval*, alors ce sont uniquement les pentes en dessous du skieur qui constituent une menace.

Ainsi, l'effort d'explication a pour l'instant été centré sur les cas bien tranchés. L'explication de cas intermédiaires sera validée à moyen terme dans la phase de test terrain par les professionnels. L'approche développée ne peut donc pas être fournie en l'état au grand public, mais nécessite une phase de test importante, que ce soit pour la validation du résultat final obtenu ou pour l'explication de ce résultat.

## Synthèse

Pour résumer, au vu des résultats issus de cette première phase de validation, nous pouvons conclure que le système présente un taux de réussite de 100% sur les niveaux  $n$  et  $n+1$  tandis qu'il a parfois été mis en défaut sur le niveau  $n-1$ . Sur ce niveau, le taux de réussite obtenu s'élève tout de même à 92,8%. Cependant, une erreur obtenue au niveau  $n-1$  se répercute sur les niveaux suivants, faisant baisser les taux de réussite lors d'une exploitation automatique du système du niveau  $n-1$  aux niveaux suivants. En prenant en compte ce transfert d'erreur, le taux de réussite associé au niveau  $n$  retombe à 92,8% (les deux combinaisons mises en échec au niveau  $n-1$  le sont au niveau  $n$ ) et celui du niveau  $n+1$  à 88,2% (2 situations sur les 17 étant mal évaluées par le système).

Notons qu'en pratique, pour pallier à la répercussion d'une erreur sur les niveaux suivants, l'étape d'explication prévue dans le système de fusion et la boucle de rétroaction qu'elle induit permettent une réévaluation des premières estimations. Cette étape est essentielle dans le système pour lui donner de la flexibilité et le conduire à l'estimation de résultats de meilleure qualité. Nous avons vu en effet que la réévaluation du sous-critère C2.1 *CLPA* dans le cas de la situation 13, comptabilisée dans les taux d'échecs ci-dessus, permet finalement l'obtention par l'utilisateur d'un résultat valide. Ainsi, les taux de réussite du système d'aide à la décision développé, exploité par un utilisateur et non seulement en mode automatique, sont susceptibles d'être meilleurs.

La phase de validation présentée est limitée (faible nombre de combinaisons testées par rapport au nombre de combinaisons contenues dans le système de fusion développé); les indicateurs obtenus restent donc à relativiser. Une validation plus conséquente du système, basée sur des combinaisons plus diversifiées, doit être conduite à l'avenir afin d'obtenir une analyse plus robuste de la validité du système développé. Cette seconde phase de validation permettra soit de renforcer la validité des chiffres annoncés ci-dessus, soit de permettre la poursuite de l'amélioration continue du système.

### 4.3.4 Mise en œuvre et outils développés

#### Outils spécifiques développés pour ces travaux et mise en œuvre

Puisque, comme évoqué précédemment, le système de fusion développé doit faire à l'avenir l'objet d'une phase massive de test, des outils ont vu le jour pour permettre le recueil d'informations. En premier lieu, une application web a été développée pour permettre à un expert de découper une trace GPS d'un itinéraire de ski de randonnées en tronçons et de renseigner les valeurs qu'il associe, pour une situation donnée, aux différents critères et sous-critères. C'est cette application qui a été utilisée pour recueillir les évaluations expertes des 17 situations exploitées ci-avant (voir Tableaux 4.4 et 4.5). Elle se présente sous la forme vue dans les Figures 4.19 et 4.20 précédemment exploitées, i.e., avec une carte de localisation sur laquelle la trace GPS est visible et des tableaux renseignant les valeurs attribuées aux différents sous-critères, critères et modes de vigilance.

À cette première application s'ajoute un site web permettant l'exploitation directe des règles développées dans le système de fusion hiérarchique. Cet outil permet à l'utilisateur de renseigner les valeurs d'une combinaison à tester et d'obtenir, en retour, le résultat de la règle qui l'active dans le système de fusion (voir Figures 4.24, 4.26 et 4.27). Il permet ainsi de visualiser rapidement le résultat obtenu sur les différents niveaux d'agrégation afin de pouvoir le comparer à l'évaluation experte recueillie précédemment. Ce service fonctionne actuellement pour les trois niveaux d'agrégation présentés dans ce chapitre : c'est-à-dire le niveau  $n-2$  pour l'évaluation du sous-critère C2.6 *Peut emporter le skieur*, le niveau  $n-1$  pour l'évaluation du critère C2 *Inclinaison des pentes* et le niveau  $n$  pour l'évaluation du mode de vigilance.

Ces deux outils sont destinés, à plus long terme, à intégrer une application pour smartphones afin d'être emportés et exploités directement sur le terrain. C'est à l'issue d'une utilisation intensive du système de fusion développé (tests sur de nombreuses situations réelles) que l'on pourra rencontrer l'ensemble des situations possibles (certaines combinaisons étant rares) et poursuivre

l'amélioration du système et de sa base de règles, puis permettre sa validation générale.

Après une phase massive de test telle qu'initiée à ce jour (i.e., à partir de valeurs non floues assignées aux différents éléments), une phase de test exploitant les critères, sous-critères et paramètres fuzzifiés devra être mise en œuvre. Elle permettra d'identifier plus concrètement les apports de l'exploitation de la théorie des sous-ensembles flous.

Notons que les outils développés et en particulier le premier, qui offre d'importantes possibilités de discussions et d'échanges sur des exemples concrets, peuvent d'ores et déjà être utilisés à des fins de formation. L'approche et les outils développés tendent donc à se diffuser. Si les applications web peuvent déjà servir de support de formation pour les guides, le système développé, à l'issue de sa phase de validation, pourra intégrer progressivement la démarche CRISTAL afin d'être exploité par des utilisateurs professionnels dans un premier temps, puis destiné à plus long terme au grand public.

Un effort de valorisation du système développé est donc en cours. Il permettra à plus long terme de faire évoluer les outils existants, par exemple en venant enrichir et compléter le processus actuel de la démarche CRISTAL disponible au grand public (<http://www.data-avalanche.org/cristal>).

Au final, le système développé présente un triple intérêt. Il peut en effet servir différents besoins :

1. Assister : en accompagnant l'utilisateur dans son évaluation du mode de vigilance à adopter sur le terrain (en phase de détection de la démarche CRISTAL) et en prenant part à la démarche globale d'aide à la décision. À partir d'évaluations menées sur des tronçons homogènes d'un itinéraire, en phase de préparation, le système pourra conduire à l'identification de passages clefs lors desquels adopter une vigilance particulière sur le terrain.
2. Former : en permettant la discussion sur la base d'exemples concrets grâce à l'outil développé, le système peut contribuer à la formation. Il permet en effet de porter de nombreuses réflexions sur les principaux critères et sous-critères exploités par le système dans l'évaluation.
3. Comprendre et analyser : en interrogeant le système sur des cas d'accidents ou des situations de quasi-accidents, il peut permettre de comprendre quel paramètre aurait pu faire basculer l'évaluation d'un mode de vigilance à l'autre. Il s'agit d'identifier quel paramètre aurait pu être non capturé par le pratiquant mais avoir joué un rôle essentiel dans la situation à laquelle il a dû faire face. Ce type d'analyse peut permettre l'amélioration de RETEX (retours d'expérience). Sur le même principe, exploiter le système peut permettre d'analyser diverses situations afin d'en identifier les éléments prépondérants et contribuer peu à peu à une meilleure compréhension de ce phénomène complexe.

#### **Autres outils développés dans le cadre du projet CIME et liés à ces travaux**

Dans le cadre plus large du projet CIME, d'autres outils ont été développés et des implémentations en lien avec les travaux présentés dans ce manuscrit ont donc vu le jour.

**Application smartphone et réseau ROMANSns** Le réseau ROMANSns<sup>3</sup> a été créé afin de réaliser des observations de terrain (relevés d'observations d'avalanches récentes et réalisation de tests nivologiques). L'objectif de ce réseau est principalement d'améliorer l'exactitude du BERA. Comme évoqué au Chapitre 2, le réseau ROMANSns a alors lancé une campagne saisonnière de réalisation de tests nivologiques permettant le recueil d'informations relatives à l'observation du manteau neigeux et l'identification de couches fragiles enfouies. Pour soutenir cette action,

3. Réseau d'Observations et de Mesures Avalanches et Neige en secteur non sécurisé

simplifier la réalisation des tests et l'enregistrement des informations associées, une application support de la réalisation des tests nivologiques à vu le jour (Figure 4.28) [Pourraz2021].

Si le processus de réalisation d'un test nivologique a d'abord été formalisé dans le cadre du projet CIME sous la forme d'un protocole, l'application développée a ensuite permis de guider l'utilisateur dans sa réalisation d'un test nivologique. Cela permet *in fine* l'obtention de tests tous réalisés dans les mêmes conditions et une harmonisation des résultats obtenus. L'application permet, entre autres :

- d'automatiser la collecte simplifiée de métadonnées,
- de saisir les données du test y compris dans des conditions difficiles (terrain soumis au vent, à la neige voire à la pluie),
- de visualiser en temps réel le profil stratigraphique,
- de visualiser en temps réel le profil de température.

La Figure 4.29 témoigne de ces possibilités à travers quelques copies d'écrans de cette application.



Figure 4.28 – Application smartphone du réseau ROMANsns pour guider l'utilisateur dans la réalisation de tests nivologiques

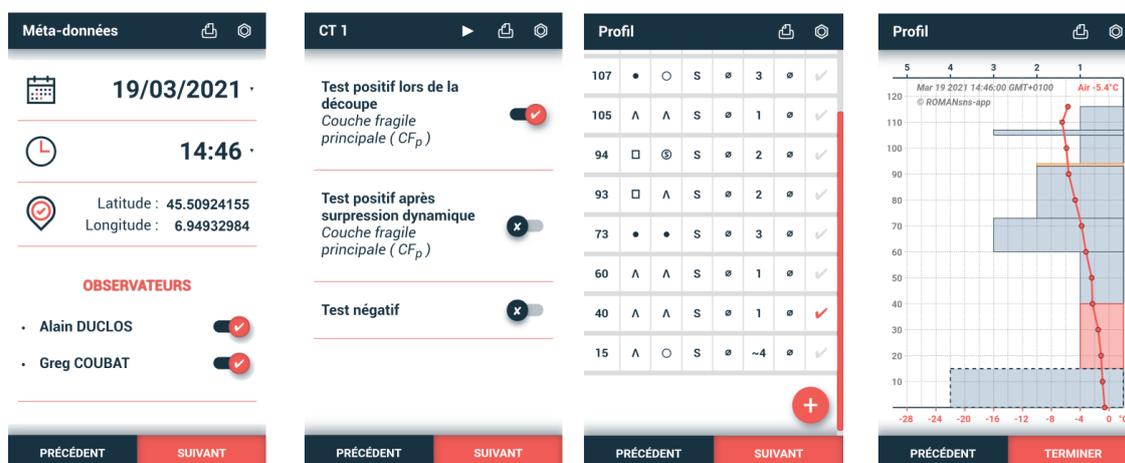


Figure 4.29 – Application smartphone du réseau ROMANsns pour guider l'utilisateur dans la réalisation de tests nivologiques

Les campagnes de mesures réalisées et les informations obtenues sont d'une part une source d'informations utiles comme données d'entrées du système de fusion développé renseignant sur l'état du manteau neigeux et donc le critère C6 *Couche fragile enfouie*. D'autre part, elles constituent aussi une base de données fournie (près de 550 tests réalisés sur trois saisons entre 2020 et 2023) qui permettra d'envisager, à l'avenir, des travaux statistiques traitant de la variabilité du manteau neigeux et envisager de mieux cerner et développer le critère C6 *Couche fragile enfouie*.

**Outil en ligne : SYNTHESIS** En fin d'hiver 2022 l'outil SYNTHESIS (Figure 4.30) [Pourraz2022], accessible via le site web de data-avalanche.org, a été mis en ligne. L'objectif de cet outil est de rendre accessible, en un seul et même endroit et de façon graphique, l'ensemble des informations disponibles qu'il est nécessaire d'exploiter dans le cadre de la démarche CRISTAL (et donc dans le système de fusion d'informations que nous avons développé). Pour chaque massif alpin français, il regroupe alors :

- le degré de danger du BERA ;
- les alertes émises par data-avalanche.org en ce qui concerne les situations avalancheuses, les précipitations (neige ou pluie) et le transport de neige par le vent ;
- un cône de visualisation de la localisation (altitude et orientation) des avalanches récentes observées ainsi que des tests nivologiques ROMANsns enregistrés, le tout sur un historique pouvant s'étendre jusqu'à 10 jours ;
- la localisation des stations de mesure FlowCapt.

Il donne aussi accès à une carte détaillée du massif choisi.

Cette source d'information est principalement utile en phase de préparation d'une sortie à ski afin de retrouver toutes les informations nécessaires pour cheminer vers une décision éclairée lors de l'exploitation de la démarche CRISTAL.

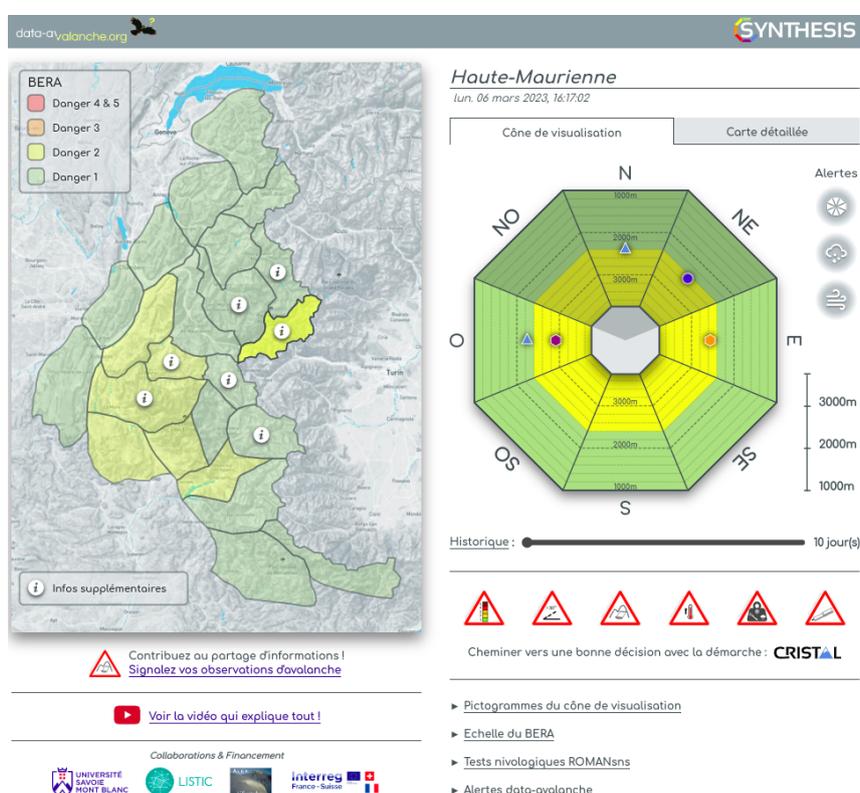


Figure 4.30 – Capture d'écran de l'outil SYNTHESIS dans le cadre du massif de la Haute-Maurienne à la date du 06 mars 2023

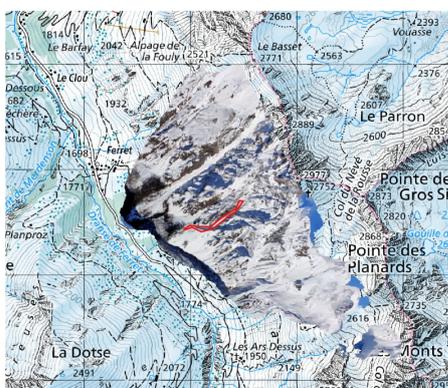
**Prototype de recueil d'observations d'avalanche *in situ* et application Outline** Comme mentionné dans le Chapitre 3 de ce manuscrit, afin de permettre l'étude d'avalanches passées, il est essentiel de disposer de données fiables et géo-référencées sur un nombre important d'enveloppes d'avalanches. Puisque l'acquisition du contour de ces observations n'est pas réalisable à distance, l'utilisateur doit la réaliser *in situ*. Pour palier à l'exposition de l'utilisateur au risque de sur-avalanche lorsqu'il se rend sur la zone exacte de l'avalanche pour en mesurer le contour au GPS, un prototype de recueil d'observations sur le terrain mais à distance de la zone impactée par l'avalanche a été développé. Grâce à cela, l'utilisateur détoure alors l'avalanche sur une photographie géo-référencée, ce qu'il peut faire à distance de la zone impactée par l'avalanche, en quelques minutes et en sécurité.

L'utilisateur exploite l'application Outline [Pourraz2022] pour prendre des photos géo-référencées et détourer une observation d'avalanche (Figure 4.31). Pour réaliser son observation il doit alors prendre trois photos successives, chacune espacée de 100 m pour être soumise à différents points de vues, et réaliser le détourage de l'enveloppe d'avalanche. Le prototype développé produit alors les deux résultats suivants (Figure 4.32) :

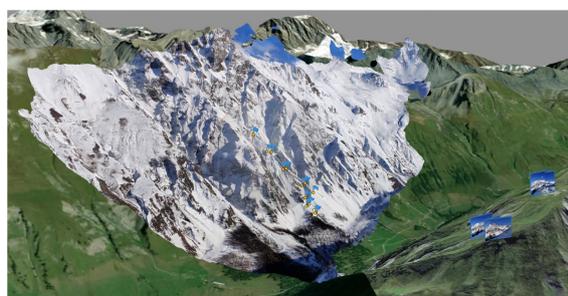
- une ortho-image qui représente précisément l'observation sur une carte 2D (Figure 4.32a),
- une modélisation 3D de l'observation que l'on peut exploiter en réalité virtuelle (Figure 4.32b).



Figure 4.31 – Application Outline pour la prise de photo et le détourage de l'observation



(a) Ortho-image représentant l'observation sur une carte 2D



(b) Modélisation 3D de l'observation et réalité virtuelle

Figure 4.32 – Produits du prototype de recueil d'observations d'avalanches

Si dans le contexte de ce manuscrit ce prototype incluant l'application Outline est utile au détournement d'une coulée d'avalanche, il est désormais générique et permet aussi le recueil d'autres observations de terrain comme un éboulement ou la présence de crevasse. Ainsi, cette application smartphone concerne à la fois le volet *Ski de montagne* du projet CIME dans lequel s'inscrivent nos travaux, mais aussi le second volet du projet CIME intitulé *Modèle 3D de voies alpines* qui s'intéresse à d'autres risques naturels que le risque d'avalanche.

## Conclusion

Pour conclure, le système de fusion hiérarchique développé dans nos travaux permet, à partir des sous-paramètres, puis paramètres, puis sous-critères, puis finalement des cinq critères principaux, d'évaluer le mode de vigilance adapté à la situation en cours. Il analyse chaque situation sur la base d'éléments factuels de terrain et de conditions nivo-météorologiques.

Ce système de fusion pour l'aide à l'évaluation du mode de vigilance exploite la théorie des sous-ensembles flous afin de permettre la traduction des valeurs linguistiques expertes issues de l'univers du discours métier. L'exploitation de cette théorie permet, lors de la phase de fusion de l'information et grâce à la base de règles développée, le lien entre les critères et les modes de vigilance obtenus en sortie. De plus, le système développé est flexible, offrant à l'utilisateur des marges de manœuvre (à travers la réévaluation des premiers résultats obtenus en fonction de sa propre analyse). Il offre aussi de la souplesse pour les phases d'analyse et de décision puisqu'il ne communique pas des résultats tranchés et catégoriques mais fait transparaître des situations intermédiaires, laissant place aux questionnements et à l'analyse et permettant d'éviter tout effet de surprise chez l'utilisateur.

Puisque le système de fusion hiérarchique pour l'aide à l'évaluation du mode de vigilance s'intègre dans la démarche CRISTAL (dans sa phase de détection), il fait alors d'elle une véritable méthode, en formalisant le passage des critères aux modes de vigilance.

Tout de même, si le système développé est appliqué à la démarche CRISTAL (communiquant en valeur de sorties les quatre modes de vigilance de cette démarche), il s'appuie sur des fondements génériques, développés aux Chapitres 2 et 3. Chacun des éléments exploités intervient alors dans le développement et l'évaluation des différents critères liés aux conditions nivo-météorologiques intervenant sous la forme d'une interaction complexe source du déclenchement des avalanches [Schweizer2003], éléments couvrant l'ensemble des méthodes d'aide à la décision existantes dans le domaine de la gestion du risque d'avalanche.

Enfin, si les résultats des premières phases de test sont prometteurs (*a fortiori* en ajoutant l'étape d'explication du résultat obtenu et la boucle de rétroaction qui s'en suit, permettant d'affiner les valeurs de sorties), une phase de test plus massive et généralisée devra être organisée.

Des développements sont donc encore nécessaires : phase de test généralisée, amélioration de l'étape d'explication du résultat obtenu, formalisation des critères restants, développement des jeux de règles propres aux critères non présentés dans ce chapitre et sur les différents niveaux. Cependant, à l'issue de ces développements, le système de fusion développé pourra servir :

- aux skieurs, amateurs et professionnels, en tant qu'outil d'aide à la décision ;
- aux formateurs pour enseigner des situations typiques d'avalanches et d'évaluation du risque en phase de préparation comme sur le terrain ;
- aux scientifiques pour les assister dans la compréhension de ce phénomène complexe ;
- aux experts dans leur analyse de situations d'accident ou presque accident afin d'identifier le ou les paramètres clefs qui ont pu être ignorés des pratiquants et source d'erreur dans la situation étudiée.



## Conclusion générale

Pour conclure ce travail, nous proposons d'abord de rappeler les problématiques retenues et donner une rétrospective des développements réalisés ainsi que des résultats obtenus. Nous donnerons ensuite les limites actuelles relatives à ces travaux ainsi que les perspectives et approfondissements possibles liés à ces résultats de recherche. Nous aborderons ces deux points d'une part de façon cloisonnée, afin de traiter des limites et perspectives propres à chacun des différents chapitres, puis, d'autre part, de manière générale dans le contexte plus large de ces travaux lié à l'estimation du danger et en particulier aux méthodes d'aide à la décision face au risque d'avalanche.

Notons en préambule que les travaux présentés dans ce manuscrit ont donné lieu à plusieurs rapports techniques et publications dont je suis auteure ou co-auteure. Les références de ces documents sont données en Annexe [E](#).

### Synthèse des principaux résultats

L'ambition générale de ce travail, focalisé, à travers le prisme de l'aide à la décision, sur la gestion du risque d'avalanche dans le cadre de la pratique des sports de montagne, est de contribuer à l'amélioration de l'aide à la décision afin de soutenir les pratiquants. Le but est alors de les assister dans la caractérisation de la vigilance requise en terrain avalancheux et de les accompagner vers une prise de décision éclairée basée sur une pleine conscience de la situation. Il s'agit en effet de réduire l'effet de surprise que les pratiquants de sports de montagne expriment généralement en cas d'avalanche. L'objectif principal est, *in fine*, de réduire au maximum les accidents et incidents survenant en terrain de montagne enneigé.

Plus spécifiquement et pour parvenir à cette fin, ces travaux se sont articulés autour de deux questions de recherche séquentielles :

1. D'abord identifier et comprendre les principaux critères pris en compte dans les méthodes d'aide à la décision et intervenant dans l'évaluation de la situation avalancheuse en cours, les formaliser et savoir les évaluer.
2. Ensuite de permettre la combinaison de ces différents critères en un résultat final de plus haut niveau, interprétable par l'utilisateur, support de son analyse et de sa réflexion pour sa prise de décision.

Les travaux présentés dans ce manuscrit visaient donc un double objectif contribuant en toile de fond à l'amélioration des méthodes d'aide à la décision existantes face au risque d'avalanche.

### **Première question de recherche : identifier, formaliser et évaluer les critères principaux à prendre en considération dans l'évaluation de la situation avalancheuse en cours**

Parmi les six critères présentés au Chapitre [2](#), nous n'avons retenu que cinq critères principaux pour évaluer la vigilance requise en terrain avalancheux. Le critère *C1 Niveau de danger du BERA*, en effet, apporte de la redondance puisque, même s'il concerne une autre échelle, il correspond déjà à une évaluation de la situation en cours et à l'agrégation de plusieurs éléments. Il n'est pas

un facteur contributeur des avalanches et ne peut donc pas être pris en compte dans la méthode au même titre que les cinq autres (C2 *Inclinaison des pentes*, C3 *Observations d'avalanches récentes*, C4 *Augmentation de température et fonte*, C5 *Surcharges nouvelles*, et C6 *Couche fragile enfouie*). Comme nous l'avons vu :

- la pente (et donc le critère C2) est un prérequis physique au déclenchement d'avalanches ;
- les observations d'avalanches récentes (C3) sont une preuve réelle de la présence d'une couche fragile enfouie et de sa capacité à propager une amorce de rupture ou permettent d'alerter sur des départs ponctuels ou des avalanches de fond ;
- les trois critères C4, C5 et C6 sont issus des situations typiques d'avalanches qui font consensus à l'échelle européenne.

S'il s'agit de ce fait de cinq critères simples à mémoriser, la réalité est cependant plus complexe. De nombreux critères sont en effet pris en considération dans la plupart des différentes méthodes d'aide à la décision existantes [Landrø2020b].

Ainsi, il a été nécessaire de décomposer et décrire ces cinq critères principaux afin de saisir l'ensemble des éléments intervenant dans l'évaluation de la situation avalancheuse en cours. De plus, il n'existe pas actuellement de cadre permettant l'évaluation de ces critères (et encore moins de l'ensemble des éléments qui en découlent). Dans ce contexte il a donc été utile de proposer une façon de les formaliser puis de les évaluer.

Cette première question de recherche a été traitée au cours des Chapitres 2 et 3.

Pour répondre à ces attentes, dans le Chapitre 2, nous avons extrait l'ensemble des sous-critères, paramètres et sous-paramètres permettant de rendre explicite les cinq critères principaux. À l'heure actuelle, nous décomposons donc ces critères en 19 sous-critères. Certains font appel à des paramètres pour être évalués ; nous comptons actuellement 13 paramètres. De même, certains de ces paramètres nécessitent l'analyse de sous-paramètres ; à l'issue de ces travaux nous avons établi pour cela 8 sous-paramètres.

De plus, des cadres permettant d'évaluer la plupart de ces éléments ont été proposés au Chapitre 2. Après avoir décomposé les critères en éléments d'ordre inférieur, nous avons déterminé les valeurs qu'ils sont susceptibles de prendre. Pour cela, nous avons établi des valeurs graduelles afin de rester au plus proche du phénomène naturel étudié et avons retenu des termes proches du langage utilisé par les experts. Ceci nous a conduit à exploiter la théorie des sous-ensembles flous et nous avons en effet établi la fuzzification de nombreux éléments afin de leur attribuer, à partir de données d'entrées, des degrés d'appartenance aux sous-ensembles flous permettant de les caractériser. Ces principaux développements ont concerné en particulier les critères C2 *Inclinaison des pentes* et C3 *Observations d'avalanches récentes*. Les critères C4 *Augmentation de température et fonte* et C5 *Surcharges nouvelles* ont fait l'objet de développements moindres (extraction d'un seul niveau, conduisant aux sous-critères). Le dernier critère, C6 *Couche fragile enfouie*, a été décrit sans exploitation de la théorie des sous-ensembles flous ; il a cependant fait l'objet de développements réalisés dans le cadre du projet CIME, en parallèle de ces travaux de recherche. Notons que les deux critères principalement étudiés dans nos travaux (liés à l'inclinaison des pentes et aux observations d'avalanches récentes) ont fait l'objet de développements supplémentaires. Il s'agissait d'évaluer plus précisément certains de leurs sous-critères ou paramètres puisque tous ne pouvaient pas être décrits sur la seule base d'une connaissance experte. À terme, ces développements permettront d'en automatiser l'estimation. Pour répondre à ce besoin, nous avons développé (et présenté au Chapitre 3) :

- une méthode d'estimation de la distance d'arrêt des avalanches dans les Alpes françaises (qui permet de renseigner le sous-critère C2.4 *Peut atteindre le skieur*, intervenant dans l'estimation du critère principal C2) ;
- une première approche permettant de quantifier la zone d'influence d'une avalanche récente observée (qui permet d'évaluer un paramètre C3.x<sub>1</sub> *Localisation*, élément permettant d'estimer le critère principal C3).

Si nous n'avons pas proposé des cadres stricts à l'évaluation de l'ensemble des éléments que nous avons fait émerger au Chapitre 2, l'ensemble des critères a été explicité *a minima* de façon théorique pour permettre la caractérisation de la situation avalancheuse en cours. La décomposition de ces critères et l'évaluation proposée pour chacun des éléments dégagés se veut autant que possible générique ; chacun d'eux peut alors être repris afin d'être intégré ou exploité dans les méthodes d'aide à la décision existantes.

Ainsi, ces travaux, présentés dans deux chapitres, ont permis de répondre à la première question de recherche. Les éléments de base utiles à l'évaluation de la situation avalancheuse en cours ont en effet été explicités. Les cinq critères principaux ont été décomposés et certains sous-critères ou paramètres, qui ne pouvaient être directement extraits de connaissances expertes, ont fait l'objet de développements supplémentaires. À l'issue de ces travaux, le critère C2 *Inclinaison des pentes* est le plus avancé. Hormis en ce qui concerne l'évaluation de son sous-critère C2.7 *Surface mobilisable* (ayant émergé tardivement avec l'amélioration continue du système de fusion développé), ce critère est évaluable de bout en bout. Le critère C3 *Observations d'avalanches récentes*, bien que concerné par de nombreux développements, reste quant à lui plus limité (voir ci-après). Ces cinq critères (et l'ensemble des éléments qui les composent) doivent ensuite faire l'objet d'une combinaison conduisant au résultat final. C'est donc la seconde question de recherche qui doit pour cela être abordée.

### **Deuxième question de recherche : déterminer un résultat final caractérisant la vigilance requise par le pratiquant face à la situation avalancheuse en cours**

Ayant connaissance de chacun des éléments à prendre en compte pour évaluer la situation en cours, il s'agit désormais d'obtenir un résultat final, support de l'aide à la décision. Pour ces développements, nous nous sommes placés dans le contexte appliqué de l'amélioration de la démarche CRISTAL. Le résultat final à obtenir en sortie du système développé devait donc caractériser la vigilance requise par le pratiquant au vu de la situation avalancheuse estimée.

Cette seconde question de recherche a été traitée au cours du Chapitre 4. Pour répondre à cette question nous avons donc développé un système de fusion d'informations hiérarchique (i.e., basé sur plusieurs niveaux de combinaison) afin de combiner non pas seulement les cinq critères principaux mais, étape par étape, les sous-paramètres en paramètres, les paramètres en sous-critères, les sous-critères en critères et, enfin, les critères en un mode de vigilance à adopter sur le terrain.

Pour ces développements nous avons traduit la connaissance de l'expert dans le système de fusion hiérarchique. Nous avons donc procédé par 1) interrogation de l'expert pour recueillir son expertise, 2) mise en œuvre de phases de test et 3) amélioration continue.

Ces travaux ont permis :

- de développer un système de fusion hiérarchique, exploitant la théorie des sous-ensembles flous (afin de prendre en compte l'estimation graduelle des différents éléments à combiner, héritage de la description floue développée lors de la première partie de ces travaux de recherche, voir ci-avant) ;
- de contribuer à l'amélioration de la démarche CRISTAL via la formalisation du passage des critères aux modes de vigilance, ce qui permet progressivement de convertir la *démarche CRISTAL* en une véritable *méthode* ;
- de prendre conscience de la nécessité de conduire une évaluation locale et à distance permettant de passer d'un mode de vigilance *Détendu* à un mode *Méfiant*, ce qui constitue une avancée par rapport à l'approche CRISTAL initiale.

Enfin, une phase de validation a permis de certifier la bonne traduction des connaissances expertes dans le système développé.

Ainsi, ces travaux, présentés au Chapitre 4, ont permis de répondre à la seconde question de recherche et ont consisté en l'extraction des règles de combinaison (réparties sur plusieurs niveaux

successifs) permettant l'obtention d'un résultat final. De plus, une phase d'explication du résultat a été envisagée afin d'offrir à l'utilisateur une ré-évaluation (éventuellement plus précise et plus correcte) des éléments qui ont joué un rôle majeur sur le résultat, lui permettant de s'investir davantage dans la méthode et de préciser son résultat, tout en restant borné par les premières estimations.

### Réponse générale : mise en perspective par rapport à l'existant

En identifiant les points forts, les manques et par conséquent les besoins permettant l'amélioration des performances des méthodes d'aide à la décision existantes (efficacité d'utilisation, meilleure conscience de la situation en cours, amélioration des prises de décision), nous avons fait émerger à l'issue de l'état de l'art présenté dans le Chapitre 1 sept besoins principaux.

Nos travaux ont permis de répondre aux différents besoins utiles au développement d'une future méthode ou à l'amélioration d'une méthode existante. La liste ci-dessous rappelle chacun de ces besoins (en italique) et formule les résultats des travaux présentés dans ce manuscrit :

1. *Être utilisable durant l'ensemble des phases d'une sortie à ski pour permettre une réévaluation des premières conclusions offrant une tolérance aux fautes.*  
De façon classique, l'analyse des différents éléments exploités (critères, sous-critères, etc.) peut être réalisée en phase de préparation (à la maison) comme lors des phases de terrain (arrivée sur le terrain et passages clefs) l'utilisateur disposant alors, selon les cas, d'informations plus ou moins précises et en plus ou moins grand nombre. De plus, nous avons mis en évidence dans nos travaux que l'analyse était de courte portée (évaluation locale, valide pour un tronçon d'itinéraire et non un itinéraire tout entier). L'analyse est donc à reconduire plusieurs fois pour un même tracé. De plus, elle intègre une notion liée à ce qu'il se passe *ici* vs ce qu'il se passe *là-bas* (associée à une zone tampon) nécessitant là-aussi plusieurs évaluations et réévaluations permettant une plus importante tolérance aux fautes.
2. *Présenter une certaine flexibilité offrant à l'utilisateur des marges de manœuvre lui permettant d'être plus proche de ses attentes et de s'investir davantage dans le processus d'évaluation.*  
Le résultat obtenu par le système développé est d'abord expliqué à l'utilisateur lui permettant de le comprendre (les règles mises en œuvre, les critères exploités et leur rôle lui sont communiqués). Si le système développé a pour vocation de proposer, *a minima* pour certains éléments, une évaluation automatique, l'utilisateur est ensuite en mesure de réitérer le processus et d'adapter les valeurs qui leur sont attribués. Il peut alors trancher lui-même en faveur de l'un ou l'autre des sous-ensembles flous caractérisant un élément et ayant reçu des valeurs non nulles. L'utilisateur prend ainsi davantage part à la méthode et confirme ou améliore le résultat préalablement obtenu.
3. *Veiller à ce que la méthode ne soit pas totalement subjective.*  
En lien avec le point ci-dessus, l'utilisateur ne pouvant pas, en seconde itération, attribuer n'importe quelle valeur aux différents éléments (puisque'il ne peut choisir que parmi les sous-ensembles flous n'ayant d'abord pas reçu de valeur non-nulle), ce dernier reste borné par le système (et sa première évaluation en partie automatique). Cela évite donc l'absence totale de cadre dans la méthode.
4. *Traduire une vue d'ensemble de la situation et couvrir un grand nombre de critères.*  
La décomposition des cinq critères principaux en nombreux sous-critères, paramètres et sous-paramètres illustre le fait que le système développé permette de capturer l'ensemble de la situation à analyser.
5. *Conserver un nombre de paramètres suffisamment réduit pour que le résultat obtenu reste aisément interprétable par l'utilisateur.*

Bien que ce besoin soit antagoniste au précédent, le système développé parvient à le satisfaire lui-aussi. En effet, du fait de recourir à plusieurs niveaux d'agrégation successifs (via l'aspect *hiérarchique* du système de fusion), le nombre d'éléments combinés dans les règles reste, à chaque étape, faible, compréhensible et facilement interprétable par un être humain.

6. *Être à la fois statistique et experte.*

Le système développé est statistique car certains éléments sont en cours d'automatisation et fuzzifiés sur la base d'analyses statistiques (c'est notamment le cas du sous-critère et du paramètre présentés au Chapitre 3). Cependant, le système développé reste aussi expert puisque d'autres éléments sont fuzzifiés sur la base de connaissances expertes et, surtout, l'ensemble des règles de combinaison sur lequel repose le système de fusion n'est autre que la traduction de connaissances expertes.

7. *Intégrer une logique plus souple pour gérer les incertitudes et intégrer un raisonnement humain.*

Le système développé exploite la théorie des sous-ensembles flous qui permet avant tout de gérer la gradualité inhérente aux différents éléments à combiner. Elle permet aussi de conserver les termes de l'univers du discours des experts du domaine.

Nos travaux ont donc conduit au développement d'un système de fusion hiérarchique exploitant la théorie des sous-ensembles flous et permettant de combiner de multiples informations (souvent imprécises, hétérogènes et dont les effets sont graduels). S'il vise, d'une part, à l'amélioration des méthodes d'aide à la décision existantes en répondant aux différents besoins que nous avons dégagés de l'état de l'art, il contribue, d'autre part, à l'amélioration de la démarche CRISTAL.

En particulier, les travaux généraux conduisant à la décomposition des cinq critères principaux en l'ensemble des éléments à prendre en compte pour estimer la situation avalancheuse en cours (Chapitre 2) peuvent contribuer à compléter, préciser ou améliorer les méthodes d'aide à la décision existantes. Certaines, en effet, sont basées sur un faible nombre de critères ne permettant pas une analyse complète (c'est le cas des méthodes de réduction de Munter par exemple), tandis que d'autres incluent des critères sans fixer de cadre précis à leur évaluation (comme le font par exemple les méthodes SoG ou OCM). De plus, les travaux plus spécifiques développés dans le Chapitre 3, portant sur la distance d'arrêt des avalanches ou encore sur le développement d'une première approche permettant de mieux cerner quelles zones sont soumises à des crues avalanches au même moment, contribuent à la compréhension des phénomènes et rendent possible l'amélioration de critères exploités dans les différentes méthodes.

Cependant, la formalisation des règles de combinaison présentées au Chapitre 4 (et détaillées en Annexe D), puisqu'elles sont appliquées à la démarche CRISTAL et traduisent la vision experte d'Alain Duclos pour formaliser le passage des cinq critères aux quatre modes de vigilance, contribue à un apport propre à la démarche CRISTAL.

En répondant à l'ensemble des besoins mentionnés ci-dessus, nous avons donc contribué en une possible amélioration des méthodes existantes et en une certaine amélioration de la démarche CRISTAL ; sa position sur la Figure 1.2 présentée au Chapitre 1 a donc évolué (voir Figure 5.1). À ce sujet, nos travaux répondent donc au triple objectif évoqué au premier chapitre en ce qui concerne l'amélioration de la démarche CRISTAL :

1. la faire se rapprocher du centre (i.e., perdre en subjectivité et rester utilisable dans toutes les phases d'une randonnée à ski) ;
2. être représentée par un disque bicolore (i.e., être à la fois statistique et experte) ;
3. exploiter le potentiel dont elle dispose déjà (i.e., intégrer des critères capables de donner une vision d'ensemble de la situation et donc être représentée par un disque de large diamètre).

À l'issue de nos travaux, en effet, CRISTAL est toujours représentée par un cercle de grande dimension, ce qui signifie qu'elle fournit une bonne vision d'ensemble de la situation en cours. De même, elle reste placée au centre de l'axe vertical, ce qui correspond à une utilisation dans les deux

phases d'une sortie à ski (i.e., en phase de planification et dans les phases de terrain). CRISTAL conserve donc ses deux points forts. De plus, tout en conservant des marges de manœuvre pour l'utilisateur, nous réduisons, grâce à nos développements, la subjectivité. En effet, nous formalisons d'une part le passage des cinq critères aux quatre modes de vigilance et, d'autre part, nous bornons l'utilisateur, pour sa réévaluation de certains critères, entre des valeurs pré-établies. CRISTAL est donc déplacée vers le centre de l'axe horizontal. De plus, la méthode, dont l'évaluation de certains critères repose aujourd'hui sur des statistiques, fait désormais l'objet d'une représentation par un disque bicolore puisqu'elle devient à la fois statistique et experte.

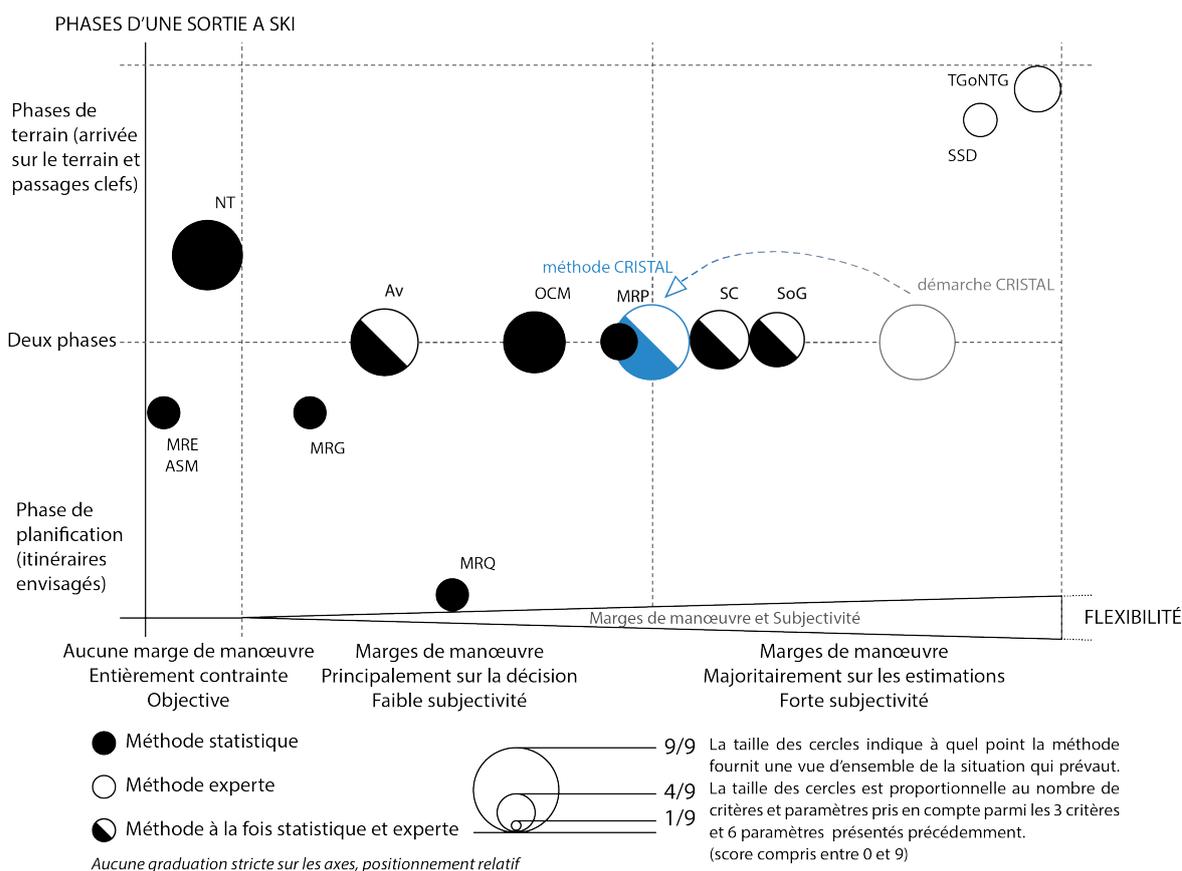


Figure 5.1 – Évolution de la place de CRISTAL dans la synthèse des méthodes existantes

Bien sûr, nous rappelons ici que l'objectif principal de ces travaux est de valider le concept du système de fusion hiérarchique développé, même s'il reste à poursuivre et conduire des travaux sur de nombreux points pour l'exploiter de bout en bout. Ainsi, la section suivante en présente les limites et perspectives.

## Principales limitations et perspectives de ces travaux de recherche

Ces travaux de thèse marquent le début d'un processus de recherche qui, bien sûr, devra être complété à l'avenir. Plusieurs points peuvent donc être vus comme des orientations intéressantes pouvant ou devant être approfondies lors de recherches ultérieures.

Les perspectives spécifiques, liées à chaque thématique abordée (i.e., propres à chacun des différents chapitres) sont d'abord présentées. Les perspectives plus globales sont données ensuite.

## Limites et perspectives spécifiques aux différents chapitres

**Chapitre 2** Les critères C4 *Augmentation de température, fonte* et C5 *Surcharges nouvelles*, liés aux conditions météorologiques correspondent à des éléments déclencheurs et aggravants, mais ne constituent pas des éléments strictement nécessaires au déclenchement des avalanches, notamment dans le cas d'avalanches de plaques (type d'avalanche menaçant le plus les pratiquants de sports de montagne). Pour ces raisons, ces critères n'ont pas fait l'objet d'étude approfondie et devront faire l'objet de développements futurs. Si nous avons extrait de manière théorique leurs sous-critères (constituant un niveau d'agrégation), nous n'avons en effet pas étudié les niveaux d'ordres inférieurs (paramètres, sous-paramètres, etc.) qui peuvent être nécessaires à leur évaluation. Ces développements devront donc être traités ultérieurement.

Des analyses et études approfondies devront par exemple être conduites afin de confirmer ou infirmer l'hypothèse suggérée en Section 2.5.2 du Chapitre 2 selon laquelle la caractérisation de la surcharge induite par la neige est dépendante de la fréquentation, ce qui n'est pas le cas d'une surcharge par la pluie; hypothèse pour laquelle il n'y a encore aucune certitude à ce jour. Cette étape préalable sera nécessaire à la fuzzification et l'exploitation des deux sous-critères C5.2 *Neige* et C5.3 *Pluie*. Il en est de même en ce qui concerne les sous-critères propres au critère C4 *Augmentation de température, fonte*. D'abord, si C4.1 *Augmentation de température* peut bien sûr émerger directement de la température surface neige, il pourra plus tard être le fruit d'une agrégation préalable de plusieurs paramètres, la température du manteau neigeux étant principalement influencée par le rayonnement thermique et le vent [Schweizer2010a] [Harvey2018c]. Ensuite, le sous-critère C4.2 *Humidification* pourra lui aussi être à l'avenir le résultat d'une agrégation préalable de plusieurs paramètres permettant de traduire les différentes questions intervenant dans l'évaluation de l'humidification, telles que : Y a-t-il un fort ensoleillement ? Où se situe l'isotherme 0°C ? La température de l'air est-elle positive ? Depuis combien de temps ? Y a-t-il eu regel nocturne ? Notons par ailleurs que des travaux portant sur l'humidification du manteau neigeux sont actuellement conduits au laboratoire dans le cadre de la thèse de Matthieu Gallet<sup>4</sup>. Enfin la fuzzification du sous-critère C4.3 *Épaisseur croûte de regel* devra être traitée ultérieurement, soit par l'intermédiaire de travaux d'analyse de données, soit sur la base de connaissances expertes.

De façon similaire et comme mentionné au Chapitre 2, d'autres sous-critères voire paramètres devront être précisés et décomposés en éléments d'ordre inférieur. C'est le cas du critère C3 *Observations d'avalanches récentes* en ce qui concerne les paramètres C3.1<sub>1</sub> *Localisation* et C3.1<sub>2</sub> *Similitude*. Bien qu'ils aient été décomposés en sous-paramètres, leurs développements restent limités. En effet, les travaux développés sur la localisation et présentés au Chapitre 3 correspondent à une première avancée et sont susceptibles d'évoluer à l'avenir pour mieux prendre en compte le phénomène complexe qu'ils tentent de traduire. Au même titre, la similitude et ses sous-paramètres (C3.1<sub>2,1</sub> *Altitude* et C3.1<sub>2,2</sub> *Exposition*) devront faire l'objet d'investigations supplémentaires. Il en est de même en ce qui concerne C2 *Inclinaison des pentes* à propos du sous-critère C2.7 *Surface mobilisable* puisque ce dernier n'a émergé que tardivement avec l'avancée des travaux lors d'une phase d'amélioration continue du système de fusion développé (voir Chapitre 4). Par conséquent, sa décomposition n'a pas été réalisée dans ces travaux et devra être traitée à l'avenir pour permettre son évaluation.

Une autre perspective, évoquée au Chapitre 2, réside dans la prise en compte d'éléments complémentaires utiles à l'évaluation des cinq critères principaux. Il s'agira alors de considérer la prise en compte de la *récence* des observations d'avalanches récentes (paramètre C3.x<sub>4</sub>), de l'*effet positif* de l'augmentation de température et fonte (sous-critère C4.4) ou encore de l'*ancienneté* des surcharges nouvelles (sous-critère C5.4). Ces éléments devront donc faire l'objet d'investigation pour être décrits, évaluables et intégrés dans le système de fusion d'informations.

4. <https://www.univ-smb.fr/listic/presentation/membres/post-docs-doctorants/matthieu-gallet/>

De plus, l'évaluation du critère C6 *Couche fragile enfouie* telle que décrite au Chapitre 2 correspond à une évaluation locale (basée sur les avalanches observées à proximité ou la réalisation d'un test nivologique sur place). Cependant, l'utilisateur de la méthode ne disposera pas toujours d'information locale. Une perspective réside donc, en l'absence de ces informations, dans la réalisation d'une extrapolation à partir d'informations plus éloignées. La transférabilité des informations observées à distance de la zone fréquentée par le skieur pourra se faire en exploitant les mêmes bases que celles développées pour le paramètre C3.1<sub>1</sub> *Localisation*. Le test nivologique en effet n'est autre qu'un cas particulier d'une observation d'avalanche, tous deux permettant la mise en évidence de la présence d'une couche fragile enfouie dans le manteau neigeux. Les tests sont réalisés et les avalanches se produisent à l'endroit le plus critique du manteau neigeux. En terme de signification spatiale, un test nivologique s'apparente donc à une observation d'avalanche. La formation de couches fragiles dans le manteau neigeux, comme le déclenchement d'avalanches, est liée aux conditions rencontrées sur le terrain. Il s'agit alors de considérer les zones soumises à des conditions similaires. Ceci constitue actuellement une perspective à ces travaux, qui pourra être prise en compte soit sous la forme d'un sous-critère additionnel (du type C6.3 *Extrapolation*), soit sous la forme d'une méthode d'extrapolation des informations distantes en informations valables localement.

Ensuite, pour mémoire, la fuzzification du sous-paramètre C3.1<sub>3,2</sub> *Largeur avalanche* a été déclinée en deux cas distincts selon la largeur de la pente (selon qu'elle soit *inférieure ou égale à 20 m* ou *supérieure à 20 m*). Si cela a déjà été mentionné au Chapitre 2 il reste utile de rappeler ici que l'ajout de la prise en compte de degrés de confiance caractérisant l'une ou l'autre des informations est une piste intéressante. Les informations issues d'une pente de 20 m ou moins sont en effet moins informatives et fiables, en vue d'être transférées à d'autres étendues, que celles issues d'une pente de plus grande dimension. L'ajout de degrés de confiance permettrait ainsi de préciser l'analyse et fait alors l'objet d'une perspective à nos travaux.

Enfin, dans le cadre de nos travaux et dans un nécessaire souci de simplification du phénomène étudié, nous avons porté sur les différents critères une vision fragmentée, dans laquelle chaque critère est indépendant des autres. Bien sûr, il existe pourtant dans la réalité une relation complexe unissant les différents critères considérés [Schweizer2003]. Actuellement, certaines interactions sont traduites lors de l'étape de combinaison, grâce aux règles. Par exemple, la taille des avalanches attendues est étudiée par le biais de la surface mobilisable (liée à C2), de l'évaluation de la continuité de la couche fragile (liée à C6) et de l'épaisseur du manteau neigeux liée à une éventuelle surcharge (C5). C'est lors de la combinaison des trois critères que le croisement de ces différentes informations renseigne sur l'aspect plus ou moins critique de la situation en cours. Par ailleurs, certains éléments sont parfois susceptibles d'agir sur plusieurs critères à la fois : c'est le cas par exemple des précipitations sous forme de pluie. Ces dernières génèrent à la fois une humidification du manteau neigeux et une surcharge (et impactent donc les critères C4 *Augmentation de température, fonte* et C5 *Surcharges nouvelles*). De même, l'humidification du manteau neigeux peut avoir un impact sur la couche fragile (qui concerne alors le critère C6). Puisque les critères présentent en réalité des relations plus complexes que la vision fragmentée que nous avons choisi de considérer dans un premier temps, il pourrait être envisagé comme perspective à long terme de quitter un modèle très linéaire pour évoluer vers un modèle plus complexe, intégrant ces interactions et plus représentatif de la réalité.

Pour nuancer ces propos, notons que l'obtention d'un système complet, finalisé et validé, en prenant l'hypothèse d'indépendance entre les critères, représente déjà un challenge en soit. Ainsi, c'est principalement si l'étape de validation fait ressortir certaines situations incohérentes ou non-définies que se posera plus véritablement la question du développement d'un système plus complexe.

**Chapitre 3** Nous rappelons que ce chapitre a traité de deux sujets distincts : 1) la fuzzification de la distance d'arrêt des avalanches et 2) l'estimation de la criticité d'une observation d'avalanche

récente du fait de sa localisation. Nous exploitons donc dans cette section deux sous-parties afin de traiter respectivement les limites et perspectives de l'un et de l'autre.

#### À propos de la **fuzzification de la distance d'arrêt des avalanches**

Le modèle flou développé, exprimant la distance d'arrêt des avalanches dans les Alpes françaises, est inspiré des modèles statistiques existants et 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° parcourue par l'avalanche et la distance plane totale associée à la même avalanche. 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 nous avons pu l'évoquer précédemment). Nous avons vu, en effet, que quelques cas d'avalanches particuliers sortent du modèle. Pour intégrer ces cas plus extrêmes, liés à une configuration particulière du terrain, le modèle devrait inclure une analyse naturaliste (i.e., fondée sur l'expérience, qualitative et analytique) propre à chaque cas. De façon similaire, on comprend à la lecture de [Ancey2006] la "*nécessaire complémentarité entre une approche naturaliste (qualitative) et une vision scientifique mécaniste (quantitative) de la nivologie*". L'approche qualitative dans notre cas viendrait compléter l'approche statistique ; l'analyse naturaliste serait alors basée sur la topographie générale du couloir d'avalanche et non plus seulement sur sa trace centrale. Cela permettrait de prendre en considération 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'avalanches se divisant en deux branches, réduisant ainsi la distance de l'écoulement. Cela peut donc faire l'objet de perspectives à ce travail. Notre approche ne couvre en effet pas l'ensemble de la réalité naturelle du phénomène étudié, certainement plus variable et complexe que le cas général.

Ensuite, nous pouvons espérer, à l'avenir, ré-établir ces droites de régression à partir d'une base de données plus conséquente, intégrant des enveloppes d'observations d'avalanches mesurées dans les prochaines années, entre autre grâce à l'application Outline et les outils d'analyse d'images développés dans le projet CIME (voir Section 4.3.4). Ceci permettra alors de préciser les équations des droites de régression à partir d'un nombre de cas d'autant plus significatif. De plus, nous pourrions envisager l'utilisation de régressions non plus linéaires mais de degrés plus importants pour tenter d'obtenir un modèle qui s'approche encore davantage des données observées. Notons que ce travail a été réalisé, mais que le degré le plus adapté peut varier très vite en ajoutant ou en supprimant des observations ; nous n'avons alors pas trouvé la façon de déterminer de manière automatique le degré idéal de chaque régression. C'est pourquoi nous avons conservé un degré 2.

Pour enrichir la base de données, nous pourrions envisager d'inclure dans l'analyse des observations d'avalanches dont les enveloppes (et donc les traces centrales, soit par conséquent les dimensions) sont moins précisément connues (du fait de mesures plus grossières sur le terrain ou d'un positionnement et d'estimations sur une carte par exemple). Dans ce cas, nous pourrions exprimer la variable expliquée (longueur planimétrique de l'avalanche) sous forme de nombres flous, et développer ensuite ces travaux sur la base de régressions linéaires floues. Cependant, à ce stade de l'avancement de nos travaux et dans le cadre du projet CIME, destiné aux professionnels de la montagne, il nous semble opportun de conserver uniquement les données les plus précises, les plus fiables et les plus facilement interprétables, afin de conserver au niveau du modèle, une compréhension générale nous permettant de générer un plus haut niveau de confiance de la part des utilisateurs. De plus, la compréhension de l'incertitude propre à chaque observation et sa traduction en nombre flou n'est pas triviale pour les avalanches n'ayant pas fait l'objet de mesure GPS. A contrario, l'explicitation des enveloppes d'avalanches prises en compte dans cette étude sous forme de nombres flous n'avait que peu d'intérêt, l'imprécision des mesures GPS ou du Modèle Numérique de Terrain utilisé étant faible devant la variabilité intrinsèque du phénomène.

#### À propos de l'**estimation de la criticité d'une avalanche du fait de la localisation**

Tout d'abord, nous pouvons dire que notre évaluation n'est valide que pour les avalanches spontanées. En effet, nous ne prenons en compte dans les variables du processus de classification multi-niveaux que des données de précipitations et nous ne prenons en compte qu'une seule

journee pour estimer la tendance qui a conduit aux avalanches observées et la criticité des différentes étendues. Le processus développé est donc valide pour les avalanches spontanées, car 1) la surcharge induite par de nouvelles précipitations est le paramètre prépondérant qui induit les avalanches spontanées, et 2) ces avalanches se déclenchent généralement juste après une nouvelle surcharge (dans un délai de l'ordre de un jour). Cependant, pour transférer cette évaluation aux avalanches déclenchées (aussi appelées avalanches accidentelles), 1) le processus de classification multi-niveaux ne devrait pas se baser uniquement sur des informations de cumuls de précipitations, mais devrait aussi intégrer d'autres variables comme la température et le vent, et 2) l'analyse devrait être basée sur plusieurs journées puisque les avalanches accidentelles sont issues d'évolutions plus complexes. Ces deux affirmations sont des perspectives possibles aux travaux présentés dans cette section. Ainsi, l'estimation de la criticité présentée au Chapitre 3 est une première proposition, amenée à évoluer à l'avenir.

Comme nous l'avons mentionné au Chapitre 3, à proximité des limites marquant les différences de conditions (plus ou moins favorables) associées à chaque étendue et pour chacune des tendances obtenues, nous ne pouvons pas garantir la valeur de criticité à associer au paramètre *Localisation*, en particulier dans les zones de fort contraste (passant de la classe *verte* à la classe *rouge* sans transition par la classe *jaune*). Nous pouvons donc envisager, à l'avenir, d'étudier un positionnement plus précis des limites entre les zones de conditions plus ou moins favorables. Notons que, quelle que soit la technique utilisée pour convertir le résultat ponctuel en un résultat surfacique, plus le réseau de stations de mesure sera dense et plus l'information résultante sera précise. Par ailleurs, en l'absence d'informations plus précises, il pourra être envisagé de tenir compte des imprécisions et incertitudes liées au positionnement des limites. Nous pouvons donc envisager l'obtention de transitions plus progressives entre les zones (voir 1 ci-dessous), voire une extrapolation graduelle de la valeur à associer à chaque point (plutôt qu'une valeur unique par polygone comme nous l'avons proposé par le diagramme de Voronoï) (voir 2 ci-dessous). Nous proposons pour cela le recours à une description floue. Dans ce cas, un skieur, comme une avalanche, pourra appartenir avec différents degrés d'appartenance à chacune des trois zones (*verte*, *jaune* et *rouge*). Notons que les deux possibilités qui peuvent être proposées sont basées sur l'hypothèse d'un phénomène graduel linéaire.

1. Considérer une zone tampon autour des différentes limites. Dans cette zone, le passage d'une classe à l'autre sera alors progressif. La Figure 5.2 en explicite le principe. Nous pouvons appliquer cette description floue aux limites issues du diagramme de Voronoï, cependant, cela ne résout pas le problème mentionné au Chapitre 3, évoquant l'absence de transition progressive parfois visible entre deux zones de fort contraste. Dans le cas d'une limite entre la zone *rouge* et la zone *verte*, le point flou obtenu aura des degrés d'appartenance à ces deux zones tout en conservant une valeur nulle pour la zone intermédiaire *jaune*. Si les valeurs sont alors plus progressives, avec une transition moins abrupte de l'un à l'autre, cela reste partiellement en contradiction avec l'hypothèse d'un phénomène totalement graduel.
2. Attribuer des valeurs d'appartenance à une zone ou une autre sur la base d'une triangulation. Dans ce cas, la valeur d'appartenance à chacune des trois classes sera tirée des valeurs des trois stations associées au triangle considéré, avec une pondération réalisée sur la base de l'inverse des distances. La Figure 5.3 en illustre le principe. L'utilisation de la triangulation génère cependant plusieurs limitations. Cela ne fonctionne en effet que pour les étendues comprises à l'intérieur de l'enveloppe englobant l'ensemble des stations et induit une perte d'informations pour les portions de massifs alpins français situées à l'extérieur de la triangulation (voir Figure 5.4). De même, l'estimation de la classe d'une avalanche localisée dans le Queyras par exemple sera de moindre qualité, le triangle associé à cette position (situé à l'est) étant de très grande dimension et basé sur une station au nord en Haute Maurienne et une seconde au sud dans le Mercantour, i.e., fortement éloignées de la zone considérée. Notons que cette limite est valable actuellement, impactant nos travaux, mais remédiable

en réalité avec l'ajout de nouvelles stations de mesure ; il s'agit en effet d'un problème de granularité des stations de mesure et non de la méthode proposée.

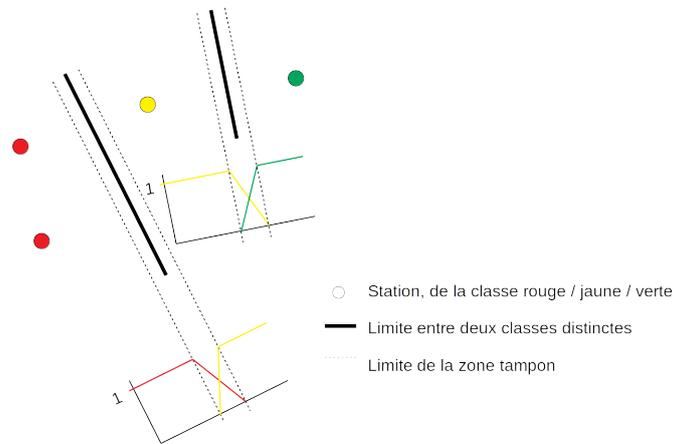


Figure 5.2 – Principe de la fuzzification à partir des limites entre classes

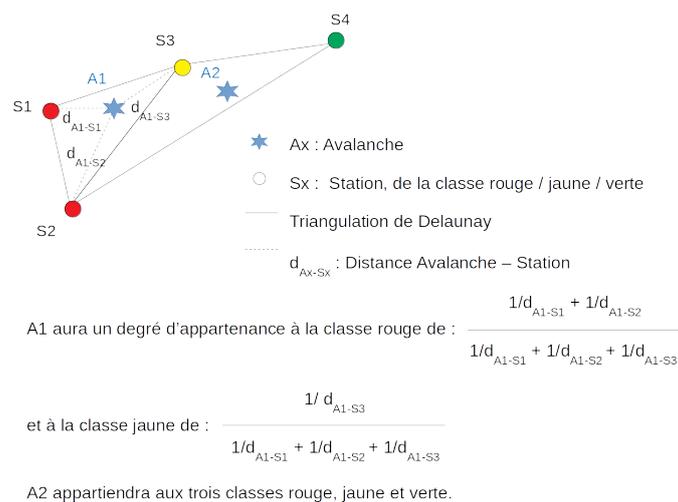


Figure 5.3 – Principe de la fuzzification à partir de la triangulation de Delaunay

Une autre limite réside dans la validation du processus de classification multi-niveaux. Nous ne pouvons pas donner de validation de la classe affectée à chacune des journées. Nous ne pouvons en effet pas donner de taux de bonne classification des différentes journées puisque la classe attendue pour chaque journée n'est pas connue d'avance (car nous ne disposons d'aucune vérité terrain complète du jeu de données). De plus, la classe associée aux différentes journées individuellement n'a pas d'importance : c'est le résultat final du processus complet de classification qui importe, pour détecter les grandes tendances affectant le territoire étudié. Ainsi, le processus de classification multi-niveaux met en valeur les différentes étendues impactées par chacune des tendances détectées. Ce résultat est particulièrement utile dans la gestion du risque d'avalanche puisque les étendues détectées correspondent aux étendues impactées par les avalanches spontanées qui ont eu lieu pour les journées correspondantes. Finalement, nous proposons de tester massivement ce processus en proposant une prochaine validation, sur le territoire étudié, grâce aux avalanches issues de la base de données de data-avalanche (avalanches enregistrées à ce jour et pour les hivers à venir), puis en le transférant à d'autres territoires. Nous avons en effet mentionné à plusieurs reprises au cours du Chapitre 3 que la méthode développée se veut générique et



Dans le second cas, si l'hypothèse est vraie, alors, pour augmenter la détection de la tendance, il faudrait que le ratio entre la zone étudiée et la zone couverte par cette tendance soit plus important. Pour cela, nous proposons alors de travailler sur une sous-zone d'étude, de dimension inférieure à l'ensemble des Alpes françaises, mais supérieure à quelques massifs afin de conserver des différences significatives permettant de détecter les différents flux.

De plus, à propos de découpage géographique de la zone d'étude, rappelons que ce travail a été réalisé à l'échelle des Alpes françaises. Cependant, une perturbation donnée, par exemple un flux de Nord-Ouest, n'impactera pas de la même manière tous les massifs que nous avons détectés pour cette tendance (voir pour mémoire la Figure 3.25). Ainsi, il peut s'avérer utile de descendre la granularité de l'étude au niveau des départements ou des massifs afin d'obtenir davantage de nuances au sein de chacune des zones détectées. Le recours à un maillage plus fin associé à une zone d'étude plus restreinte peut permettre, à l'avenir, de préciser ces premiers résultats.

Par ailleurs, dans cette première approche, nous avons sélectionné les individus en travaillant journée par journée, i.e., par tranche de 24 heures. Cependant, en réalité, il pourrait être plus intéressant de se baser sur les perturbations dans leur globalité pour définir chaque individu. En 24 heures, deux perturbations de flux différents peuvent être susceptibles de se succéder, ce qui peut biaiser l'information que nous analysons. À l'inverse, une unique perturbation peut chevaucher plusieurs journées, réduisant alors les cumuls enregistrés (et analysés) sur chacune d'elles, ce qui peut en réduire les chances de détection. Ainsi, se baser sur l'analyse des perturbations complètes en tant qu'individus et non sur un découpage journalier peut permettre une amélioration des résultats obtenus.

De plus, à propos de temporalité, nous pouvons préciser que l'aspect temporel d'une perturbation n'a pas été pris en compte. Une perspective intéressante à étudier à l'avenir réside dans la notion d'anticipation des conditions nivo-météorologiques et donc du danger à venir. Il pourrait en effet être envisagé, à partir de la détection des premières précipitations significatives sur une station de mesure, une extrapolation des précipitations à venir sur les autres stations que l'on sait impactées par cette même tendance. Cela permettrait ainsi une estimation de l'évolution du danger dans les futures zones impactées par la perturbation détectée.

Enfin, d'autres méthodes d'apprentissage non supervisé pourraient être envisagées, comme en particulier les cartes auto-organisatrices de Kohonen (SOM, pour *Self Organizing Map*) [Kohonen1998]. Cette méthode a déjà été utilisée pour classer la variabilité atmosphérique synoptique, mais a été plus rarement appliquée à la neige et aux avalanches, comme l'ont fait Shandro et Haegeli 2018 [Shandro2018] ou encore Schauer et al. 2021 [Schauer2021] qui font le lien entre conditions météorologiques et avalanches de plaques engendrées par la propagation de rupture dans une couche fragile profonde et persistante tout au long de l'hiver. Cependant, l'utilisation de SOM nécessite de sélectionner avec attention les paramètres les mieux adaptés aux données traitées pour produire un modèle de qualité, afin de paramétrer la taille de la carte et le nombre de nœuds le plus adapté aux données et au besoin. Ainsi, cette méthode ne nous permettait pas d'être directement mise en œuvre de bout en bout sans raffinement des paramètres auxquels elle fait appel. C'est pourquoi nous ne l'avons pas exploitée actuellement, mais l'utilisation de SOM pour détecter les différentes tendances affectant un territoire donné peut faire l'objet de perspectives futures, a fortiori avec la prise en compte de variables supplémentaires (comme le vent et la température, augmentant encore la dimension des données). SOM pourrait alors remplacer la séquence ACP → CAH → K-means et permettrait de tenir compte de l'aspect spatialement connexe des stations (puisque les nuages suivent une trajectoire spatiale).

Pour conclure, si le processus de classification multi-niveaux peut paraître complexe, il ne correspond en réalité qu'à une suite logique de méthodes simples (ACP, CAH, K-means), dont il est connu que le résultat de CAH avec la méthode de Ward peut être amélioré par K-means [Murtagh2014], séquence déjà mise en œuvre dans d'autres études (e.g. [Dkengne Sielenou2021]). La complexité, principalement liée au second niveau de classification, est issue du fait de fractionner le jeu de données initial en sous-jeux de données pour palier aux inconvénients générés par le

traitement du jeu de données total. Le second niveau de classification (avec la méthode AP) permet donc simplement de fusionner les résultats obtenus sur les sous-jeux de données en un unique résultat final.

**Chapitre 4** Tout d'abord nous avons vu que la phase de test du système développé est restée limitée. Elle a porté en effet sur l'analyse de 17 situations expertisées. Sur les combinaisons testées, cela a permis de vérifier que la connaissance experte était bien traduite dans le système de fusion, cependant seul un nombre restreint de combinaisons a pu être testé. Sur le niveau de combinaison  $n$  (i.e., pour combiner les cinq paramètres principaux), seules 7 combinaisons différentes sur les 430 existantes ont en effet été testées, ce qui couvre 1,6% du modèle sur ce niveau. De même, au niveau  $n-1$  en ce qui concerne le critère C2 *Inclinaison des pentes*, 12 combinaisons sur 66 ont été testées, ce qui correspond à 18,2%. Si l'on se base sur le nombre de règles exploitées et testées, les pourcentages augmentent (puisqu'une unique règle peut couvrir plusieurs combinaisons) ; nous obtenons alors 17,2% et 41,7% respectivement pour les niveaux  $n$  et  $n-1$ .

Ainsi, seule une partie du système de fusion développé a réellement été testée. Au-delà des 17 situations analysées, une phase de test massive est alors nécessaire à l'avenir afin de certifier la validité du modèle (i.e., assurer que dans toutes les situations il soit la bonne traduction du schéma de pensée de l'expert).

Ensuite, lorsque l'ensemble des éléments à prendre en considération dans le modèle aura été développé (voir perspectives liées au Chapitre 2), les règles de combinaison associées devront être établies. Les règles manquantes, liées aux différents niveaux et relatives à chacun des cinq critères, devront en effet faire l'objet de développements, au même titre que les règles de combinaison établies à ce jour. Ces travaux complémentaires constituent alors une perspective majeure du Chapitre 4. Bien sûr, à l'issue de ces futurs développements, les phases de test devront aussi concerner ces autres portions du système de fusion hiérarchique.

Notons que ces phases de test et de validation peuvent être, comme on l'a vu au cours de nos développements, des révélateurs de mise en défaut du système développé. Ainsi, de nouveaux critères ou des modifications nécessaires sont susceptibles d'émerger pour distinguer différentes situations mal interprétées dans le système. Ces évolutions ou changements devront donc être intégrés au système pour, d'une part, continuer à véritablement traduire les connaissances expertes et éventuellement, d'autre part, en améliorer ses performances.

Par ailleurs, la modélisation de la connaissance experte dans les règles a été réalisée en collaboration avec Alain Duclos, seul nivologue et expert en avalanches associé au projet. Il pourrait être envisagé, en perspective, d'étendre la modélisation des connaissances expertes par l'interrogation de plusieurs experts pouvant avoir des sensibilités différentes. La phase de test, qui peut révéler la mise en défaut du système dans certaines situations, pourrait souligner l'utilité de ce besoin. On l'a vu au cours de ces travaux, à l'issue des phases de test une amélioration continue est possible par interrogation d'Alain Duclos (qui peut lui-même prendre conscience d'éléments manquants ou erreurs de combinaison). Cependant, il pourra s'avérer utile d'intégrer dans les développements le point de vue d'autres experts afin de considérer des nuances ou éléments additionnels non pris en compte ou, encore, d'intégrer de nouvelles visions capables de faire évoluer les combinaisons afin de les rendre d'autant plus fidèles à la réalité.

À ce propos, une perspective incontournable de ces travaux est l'analyse des performances du modèle. Si nous avons vu qu'il n'est pas possible de tester les cas de non-avalanche (que ce soit dans les cas où le système indique un mode de vigilance *Détendu* ou *Méfiant*, dans lesquels aucune avalanche devrait être possible, ou dans les cas où le système renseigne un mode de vigilance *Alerté* voire *Hasardeux*, pour lesquels une avalanche est possible), il est à l'inverse envisageable de tester et évaluer les cas d'avalanche (voir Section 4.3.1 du Chapitre 4). Il est en effet possible de tester les performances du modèle uniquement dans les cas où nous disposons d'une vérité terrain, c'est-à-dire dans les cas d'avalanche (l'absence de déclenchement d'avalanche ne signifiant pas quant à lui l'absence d'une possible avalanche).

Il s'agira ainsi, à partir de situations d'avalanche observées sur le terrain, de renseigner dans le système de fusion les valeurs prises par les différents critères (et niveaux d'ordre inférieur) et d'analyser le mode de vigilance qu'il communique en sortie. Dans ces cas, le système devrait retourner un mode de vigilance *Alerté* ou *Hasardeux*. En évaluant ses réponses, nous pourrions alors établir le taux de bonne prédiction associé à ces modes de vigilance. Cette évaluation des performances du modèle pourra se faire grâce à la base de données de data-avalanche, en sélectionnant les observations d'avalanche les plus détaillées, i.e., à partir desquelles il est possible de renseigner toutes les valeurs des différents critères.

Enfin, nous avons vu que l'étape d'explication n'était pas encore totalement automatisée ni généralisée et valide pour toutes les règles. Elle est possible sur des cas bien tranchés, mais nécessite d'être approfondie et précisée sur d'autres règles. La poursuite de cette étape d'explication est donc une perspective primordiale pour que le résultat communiqué soit justifié et compris par l'utilisateur. Ce traçage et la justification du résultat obtenu est alors un gage de transparence. Rappelons en effet que le système de fusion hiérarchique développé s'inclut dans une méthode d'aide à la décision et non de décision, l'utilisateur doit donc pouvoir comprendre et interpréter l'information qui lui est apportée afin de conduire son analyse et sa décision.

## Perspectives d'ordre général

Dans ces travaux, nous avons réalisé des développements théoriques conduisant à l'émergence d'un système de fusion hiérarchique pour l'aide à la décision face au risque d'avalanche. Un outil doit désormais être développé pour intégrer ce système et en permettre l'utilisation. C'est uniquement lorsque cet outil sera développé de bout en bout (à l'issue des travaux théoriques qui restent nécessaires et ont fait l'objet des perspectives évoquées ci-avant) que le système de fusion hiérarchique développé pourra être exploité en utilisation réelle et sur le terrain. Il permettra alors de réaliser des phases de test massives d'utilisation qui permettront d'en valider les performances (comparées au jugement réalisé en parallèle par un expert sur le terrain) et d'appréhender l'aide apportée par l'exploitation de la théorie des sous-ensembles flous qui communique, comme nous avons pu le voir, des résultats moins tranchés et à cheval sur plusieurs modes de vigilance. Si nous avons d'ores et déjà pu montrer à travers un exemple l'apport offert par l'exploitation de la théorie des sous-ensembles flous dans le système de fusion, c'est cette mise en pratique qui achèvera d'en démontrer l'utilité, apportant de la finesse et du détail dans les phases d'analyse et de décision proposées par la démarche CRISTAL. Nous pouvons envisager que son utilisation sur le terrain puisse, à plus long terme, rendre progressivement les phases d'analyse et de décision de la démarche CRISTAL plus précises et complexes que celles aujourd'hui évoquées dans son processus.

De plus, au cours de nos travaux, nous avons cherché à ce que les développements réalisés soient le plus génériques possible afin qu'ils puissent s'appliquer à d'autres méthodes d'aide à la décision existantes que la démarche CRISTAL. Il est certain que les règles de combinaison de niveau  $n$ , développées au Chapitre 4 (i.e., permettant le passage des cinq critères principaux aux quatre modes de vigilance) sont propres à la démarche CRISTAL, cette dernière étant, dans nos travaux, notre cadre de développement, d'expérimentation et de validation. En effet, la notion de *mode de vigilance* et les phases d'analyse et de décision qui en découlent sont propres à la démarche CRISTAL. Cependant, les combinaisons des autres niveaux ne sont pas spécifiques à cette démarche et peuvent être adaptées à d'autres méthodes. Ces combinaisons conduisent en effet à l'estimation des cinq critères principaux qui, rappelons-le, sont issus des situations typiques d'avalanches faisant consensus à l'échelle européenne, du rôle communément admis que joue l'inclinaison des pentes sur le déclenchement des avalanches, ou encore du constat incontestable de Bruce Tremper (nivologue américain) que "*le meilleur signe de danger d'avalanche, c'est les avalanches*". De plus, l'ensemble des travaux de recherche portant sur l'évaluation des différents éléments à prendre en compte dans l'évaluation de la situation avalancheuse en cours (description

des critères en sous-critères, paramètres etc.), l'explicitation des valeurs qu'ils sont susceptibles de prendre à partir des termes du langage expert, ainsi que les analyses statistiques plus poussées qui ont pu être proposées dans ces travaux se veulent génériques. Les travaux portant sur la distance d'arrêt des avalanches ou la première approche permettant de quantifier la zone d'influence d'une avalanche récente observée, bien que réalisés à partir de jeux de données locaux, ont été développés dans le souci d'être génériques et transférables à d'autres étendues et d'autres jeux de données. Ainsi, et en particulier pour les méthodes européennes existantes, ces travaux peuvent servir d'influenceurs et s'appliquer à d'autres méthodes en vue de permettre soit de les enrichir (par l'ajout de critères non pris en compte) soit de les adapter (par une évaluation plus précise, plus cadrée et moins subjective).

Abordons désormais la question des facteurs humains. Si notre évaluation du mode de vigilance à adopter sur le terrain (liée à l'évaluation de la situation en cours) se veut une évaluation objective, elle n'est fort heureusement pas totalement indépendante du groupe. L'élément à risque (ici le groupe de skieurs), doit en effet faire partie intégrante de l'évaluation du risque puisqu'il en est l'une des composantes [Statham2008]. Dans notre système, les skieurs sont bien pris en considération ; on le voit par exemple dans les sous-critères *Peut atteindre le skieur* ou *Peut emporter le skieur*, dans lesquels ses derniers sont en effet partie intégrante de la situation évaluée. De plus, le système développé prend en compte, à travers la zone tampon, des notions liées à la dynamique du groupe : groupe évoluant à la montée ou à la descente, groupe statique ou en mouvement, groupe plus ou moins important (générant plus de chance que l'un des skieurs s'éloigne de la trace). Ainsi, quelques caractéristiques liées au groupe commencent à intégrer l'évaluation, mais celles-ci restent générales et non spécifiques à un groupe donné. Les valeurs ne sont pas, à l'heure actuelle, fixées par l'utilisateur en fonction des caractéristiques propres à son groupe. Il pourrait donc être envisagé à l'avenir que les caractéristiques du groupe interviennent davantage dans la façon de fixer la taille de la zone tampon et soient elles aussi renseignées par l'utilisateur. Tout de même, comme pour les méthodes existantes, le plus grand absent de nos travaux reste le facteur humain, puisque aucun critère de l'évaluation ne porte sur ce dernier. En effet, l'évaluation devrait ensuite inclure plus précisément les facteurs humains propres au groupe considéré : âge des participants et niveau d'engagement, niveau d'expérience et de responsabilité, capacité à réagir, etc. Si dans la démarche CRISTAL les questions liées au groupe interviennent notamment en phase d'analyse et de décision (l'évitement du danger sera possible ou non selon le niveau du groupe, de même pour la réduction du risque), il semble qu'après une première évaluation objective de la situation, la prise en compte des facteurs humains devrait être envisagée afin de permettre (selon le groupe) une aggravation de la situation évaluée et donc du mode de vigilance obtenu. La situation, liée au terrain et aux conditions nivo-météorologiques, qui est la même pour tous, peut en effet évoluer différemment (en plus d'être gérée différemment) en fonction du groupe. Par exemple, selon la taille et le niveau du groupe, le temps requis pour atteindre le sommet et débiter la descente ne sera pas le même. Un groupe de 10 skieurs ou un groupe dans lequel l'un des membres n'est pas en bonne forme physique au jour de l'évaluation sera souvent plus lent qu'un groupe de trois skieurs bien entraînés. Dans ce cas, le risque est susceptible d'évoluer différemment pour ces deux groupes, l'un des deux risquant de ne pas terminer la sortie avant que le soleil ne réchauffe et déstabilise le manteau neigeux. Ainsi, une perspective serait d'envisager la prise en compte des facteurs humains dans un complément d'évaluation du mode de vigilance intervenant avant la phase d'analyse et qui, selon le groupe, pourrait être aggravé vers des modes de vigilance plus élevés. Notons que cette évaluation est prise en compte dans la démarche CRISTAL, mais cette partie (l'estimation de la vigilance requise en terrain avalancheux *en fonction du facteur humain*) constitue une étude à part entière qui relève quant à elle des Sciences Humaines et Sociales et s'inscrit donc hors de notre domaine de compétences.

Une dernière perspective d'ordre général serait de développer une phase de test permettant de s'assurer de l'utilité de chacun des éléments combinés. Le système développé s'appuie sur de nombreux paramètres experts permettant de capturer de fines nuances théoriques. Cependant, une

fois combinés à travers les différents niveaux d'agrégation successifs, nous pouvons nous demander si chacun de ces éléments a toujours un rôle essentiel. Il se peut que certains d'entre eux (même s'ils capturent une nuance en entrée) n'aient finalement jamais d'impact sur le mode de vigilance obtenu en sortie.

Le système de fusion hiérarchique développé, exploitant la théorie des sous-ensembles flous, par nature, constitue une approximation du phénomène. Puisque ce travail est exploratoire, il peut en effet être amené à évoluer lors de phases de test. Il est possible que celles-ci puissent, à plus long terme, mettre en évidence l'inaction de certains paramètres ou certaines modalités qui, malgré des nuances proposées dans le système, pourraient *in fine*, conduire à une même valeur de sortie, donc ne pas avoir d'effet sur le résultat final. Ceci pourra être éventuellement détecté par un test approfondi du jeu de règle développé.

Par rapport aux deux vitesses de la pensée (*Système 1*, *Système 2*) évoquées dans [Kahneman2012], les méthodes d'aide à la décision et le modèle que nous développons dans nos travaux relèvent du *Système 2*, analytique et permettant de résoudre des problèmes complexes. Si, sur le terrain, cela peut éviter à l'individu d'être victime de biais de raisonnement (qu'il peut avoir via le *Système 1*, rapide et basé sur l'intuition), Kahneman suggère cependant, pour les systèmes complexes, de se limiter à des « modèles frugaux ». Ce sont des modèles utilisant peu de prédicteurs et dont les performances sont souvent égales aux modèles plus complexes basés sur un grand nombre de variables [Kahneman2021]. Il souligne par ailleurs que plus la règle est complexe, plus elle vise à intégrer des situations précises. Il s'agit alors de prendre en compte des situations particulières et finalement rares, dont l'intégration au modèle ne permet qu'une faible augmentation de ses performances.

La dernière perspective que nous évoquons aurait donc pour objectif de saisir ce qui a pu être "sur-développé", i.e., trop finement détaillé dans le modèle. Il serait alors intéressant de détecter d'éventuels éléments n'impactant que peu, voire pas, le résultat final et donc de simplifier le modèle développé.



## Bibliographie

- [AAA2010] American Avalanche Association AAA. Snow, weather, and avalanches : observation guidelines for avalanche programs in the United States. American Avalanche Association, Pagosa Springs, CO, 2010.
- [AAI2020] American Avalanche Institute AAI. *ALPTRUTH and FACETS : Two Acronyms that Can Save Your Life*, January 2020.
- [ACA2015] Association Canadienne des Avalanches ACA. Aspects techniques de la gestion des risques d'avalanche : ressources et directives pour les spécialistes des avalanches au Canada. 2015. (C. Campbell, S. Conger, B. Gould, P. Haegeli, B. Jamieson et G. Statham Eds.). Revelstoke (C.-B.), Canada : Association canadienne des avalanches.
- [ACA2016] Association Canadienne des Avalanches ACA. OBSERVATION GUIDELINES AND RECORDING STANDARDS FOR WEATHER , SNOWPACK AND AVALANCHES. 2016. version 6.1, First published 1981, A revision of : NRCC Technical Memorandum No. 132.
- [Adjel1995] Ghali Adjel. *Méthodes statistiques pour la détermination de la distance d'arrêt maximale des avalanches*. La Houille Blanche, no. 7, pages 100–104, October 1995.
- [Ahmed2016] Alaa Ahmed. *Fusing Uncertain Data with Probabilities*. Thèse de Doctorat, May 2016.
- [Ancey1996] Christophe Ancey et Claude Charlier. *Quelques réflexions autour de la classification des avalanches / Some thoughts on a classification of avalanches*. Revue de Géographie Alpine, vol. 84, no. 1, pages 9–21, 1996.
- [Ancey2001] Christophe Ancey. *Méthodes d'estimation du risque d'avalanche*. Rapport technique, 2001. Toraval, Groupement d'ingénieurs-conseils.
- [Ancey2006] Christophe Ancey. Dynamique des avalanches. PPUR, 1 édition, June 2006.
- [ANENA] Association Nationale pour l'Étude de la Neige et des Avalanches ANENA et Météo France. *Éléments de nivologie*. Anena edition.
- [ANENA2002] Association Nationale pour l'Étude de la Neige et des Avalanches ANENA. *Dossier : les tests de stabilité du manteau neigeux - Anena*. Neige et avalanches n°99, pages 8–24, 2002.
- [ANENA2018] Association Nationale pour l'Étude de la Neige et des Avalanches ANENA. *Note d'utilisation de l'EvalNivo (pour une évaluation du risque local)*, 2018.
- [Anowar2021] Farzana Anowar, Samira Sadaoui et Bassant Selim. *Conceptual and empirical comparison of dimensionality reduction algorithms (PCA, KPCA, LDA, MDS, SVD, LLE, ISOMAP, LE, ICA, t-SNE)*. Computer Science Review, vol. 40, page 100378, May 2021.

- [Atkins2000] Dale Atkins. *Human Factors in Avalanche Accidents*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Big Sky, Montana, USA, pages 46–51, 2000.
- [Atkins2004] Roger Atkins. *An Avalanche Characterization Checklist for Backcountry Travel Decisions*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Jackson Hole, Wyoming, USA, pages 462–468, 2004.
- [Bebi2016] Peter Bebi, Thomas Feistl, Michaela Teich, Stefan Margreth et Perry Bartelt. *Accounting for forest effects in avalanche models and risk analysis*. Interpraevent, Lucerne, Switzerland, page 2, 2016.
- [Behr2018] Wolfgang Behr et Jan Mersch. *Probabilistics reloaded ? A detailed avalanche accident analysis based on the snowcard*. International Snow Science Workshop Proceedings 2018, Innsbruck, Austria, pages 1301–1305, October 2018.
- [Bellaire2013] Sascha Bellaire et Bruce Jamieson. *On estimating avalanche danger from simulated snow profiles*. International Snow Science Workshop Grenoble Chamonix Mont Blanc October 07 11 2013, pages 154–161, 2013.
- [Birkeland2011] Story Karl Birkeland et Ethan Greene. *ACCURATELY ASSESSING AVALANCHE SIZE* .: The Avalanche Review, vol. 29, no. 3, page 27&32, 2011.
- [Bolognesi2000] Robert Bolognesi. *NivoTest : a pocket tool for avalanche risk assessing*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Big Sky, Montana, USA, 2000.
- [Bonnetfooy2010] Mylène Bonnetfooy, Gilles Borrel, Didier Richard, Laurent Bélanger et Mohamed Naaim. *La carte de localisation des phénomènes d’avalanche (CLPA) : enjeux et perspectives*. Sciences Eaux Territoires, no. 2, pages 6–14, 2010.
- [Bouchon-Meunier1995] Bernadette Bouchon-Meunier et Lotfi Asker Zadeh. *La logique floue et ses applications. Vie artificielle*. Addison-Wesley France, Paris ; Reading (Mass.); Amsterdam [etc.], 1995.
- [Bouchon-Meunier2013] Bernadette Bouchon-Meunier, Marie-Jeanne Lesot et Christophe Marsala. *Modelling and management of subjective information in a fuzzy setting : International Journal of General Systems : Vol 42, No 1*. International Journal of General Systems, Issue 1 : Fuzziness in Systems Modeling, vol. 42, pages 3–19, 2013.
- [Brattlien2008] Kjetil Brattlien. *Den lille snøskredboka*. 2008.
- [Brun1989] E. Brun, Martin, V. Simon, C. Gendre et C. Coleou. *An Energy and Mass Model of Snow Cover Suitable for Operational Avalanche Forecasting*. Journal of Glaciology, vol. 35, no. 121, pages 333–342, 1989.
- [Brun1992] E. Brun, P. David, M. Sudul et G. Brunot. *A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting*. Journal of Glaciology, vol. 38, no. 128, pages 13–22, 1992.
- [Bühler2014] Yves Bühler, Marc Christen, Lisa Dreier, Thomas Feistl et Perry Bartelt. *Merging of recent developments in avalanche simulation technology into practice*. September 2014.
- [Bühler2018a] Yves Bühler, Daniel von Rickenbach, Andreas Stoffel, Stefan Margreth, Lukas Stoffel et Marc Christen. *Automated snow avalanche release*

- 
- area delineation – validation of existing algorithms and proposition of a new object-based approach for large-scale hazard indication mapping.* Natural Hazards and Earth System Sciences, vol. 18, no. 12, pages 3235–3251, December 2018.
- [Bühler2018b] Yves Bühler, Daniel von Rickenbach, Marc Christen, Stefan Margreth, Lukas Stoffel, Andreas Stoffel et Roderick Kühne. *Linking modelled potential release areas with avalanche dynamic simulations : an automated approach for efficient avalanche hazard indication mapping.* International snow science workshop proceedings 2018, 2018.
- [Bühler2019] Yves Bühler, Elisabeth D. Hafner, Benjamin Zweifel, Mathias Zesiger et Holger Heisig. *Where are the avalanches? Rapid SPOT6 satellite data acquisition to map an extreme avalanche period over the Swiss Alps.* The Cryosphere, vol. 13, no. 12, pages 3225–3238, December 2019.
- [Campbell2004] Cam Campbell et Bruce Jamieson. *Spatial variability of rutschblock results in avalanche start zones.* Proceedings of the International Snow Science Workshop, Jackson Hole, Wyoming, USA, page 10, 2004.
- [Campbell2010] Cam Campbell et Peter Marshall. *Mapping Exposure to Avalanche Terrain.* 2010 International Snow Science Workshop, pages 556–560, 2010.
- [Campbell2012] Cam Campbell, Brian Gould et James Newby. *ZONING WITH THE AVALANCHE TERRAIN EXPOSURE SCALE.* undefined, 2012.
- [Campbell2013] Cam Campbell et Brian Gould. *A Proposed Practical Model for Zoning with the Avalanche Terrain Exposure Scale.* International Snow Science Workshop Grenoble – Chamonix Mont-Blanc - October 07-11, 2013, pages 385–391, October 2013.
- [Casado2010] M. J. Casado, M. A. Pastor et F. J. Doblas-Reyes. *Links between circulation types and precipitation over Spain.* Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, vol. 35, no. 9, pages 437–447, January 2010.
- [Cemagref2004] Cemagref. *GUIDE D’EMPLOI à destination des élus : CLPA LA CARTE DE LOCALISATION DES PHÉNOMÈNES D’AVALANCHE,* 2004. Cemagref et ses partenaires. ISBN : 2-85362-646-6.
- [Chehdi2014] Kacem Chehdi, Mariem Soltani et Claude Cariou. *Pixel classification of large size hyperspectral images by affinity propagation.* Journal of applied remote sensing, vol. 8, no. 1, page 1, July 2014.
- [Christen2010] Marc Christen, Julia Kowalski et Perry Bartelt. *RAMMS : Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain.* Cold Regions Science and Technology, vol. 63, pages 1–14, August 2010.
- [Chritin1999] V Chritin, R Bolognesi et H Gubler. *FlowCapt : a new acoustic sensor to measure snowdrift and wind velocity for avalanche forecasting.* Cold Regions Science and Technology, vol. 30, no. 1, pages 125–133, December 1999.
- [Cierco2007] François-Xavier Cierco. *Transport de neige par le vent : interpréter les données d’un Flowcapt.* vol. 118, page 2, 2007.
- [Cierco2013] François-Xavier Cierco et Sébastien Escande. *Decision making in avalanche terrain The extended 3\*3 method.* Proceedings of the International Snow Science Workshop, Grenoble - Chamonix Mont Blanc, France, pages 486–492, 2013.
-

- [Cingolani2013] Pablo Cingolani et Jesús Alcalá-Fdez. *jFuzzyLogic : a Java Library to Design Fuzzy Logic Controllers According to the Standard for Fuzzy Control Programming*. International Journal of Computational Intelligence Systems, vol. 6, no. sup1, pages 61–75, June 2013.
- [Clark2019] Taylor Clark. *Exploring the link between the Conceptual Model of Avalanche Hazard and the North American Public Avalanche Danger Scale*. January 2019.
- [CNRMa] Centre National de Recherches Météorologiques CNRM. *La chaîne SAFRAN-Crocus-MEPRA*. Disponible sur : <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article555> (consulté le : 10/04/2022).
- [CNRMb] Centre National de Recherches Météorologiques CNRM. *Transport de neige par le vent*. Disponible sur : <http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article477> (Consulté le : 10/06/2022).
- [Coléou2009] C Coléou, G Giraud, Y Danielou, J.-L. Dumas, C Gendre et E Pougatch. *Use of the models Safran-Crocus-Meptra in operational avalanche forecasting*. International Snow Science Workshop, Davos 2009, Proceedings, pages 341–345, 2009.
- [Das2012] R. K. Das, P. Datt et A. Acharya. *An assessment of the FlowCapt acoustic sensor for measuring snowdrift in the Indian Himalayas*. Journal of Earth System Science, vol. 121, no. 6, pages 1483–1491, December 2012.
- [Descamps2016] Philippe Descamps et Olivier Moret. *Avalanches : Comment réduire le risque*. Éditions Guérin, Chamonix Mont-Blanc, 2016. OCLC : 946500631.
- [Dkengne Sielenou2021] Pascal Dkengne Sielenou, Léo Viallon-Galinier, Pascal Hagenmuller, Philippe Naveau, Samuel Morin, Marie Dumont, Deborah Verfaillie et Nicolas Eckert. *Combining random forests and class-balancing to discriminate between three classes of avalanche activity in the French Alps*. Cold Regions Science and Technology, vol. 187, page 103276, July 2021.
- [Dreier2014] Lisa Dreier, Yves Bühler, Walter Steinkogler, Thomas Feistl, Marc Christen et Perry Bartelt. *Modelling Small and Frequent Avalanches*. International Snow Science Workshop 2014 Proceedings, Banff, Canada, pages 692–699, September 2014.
- [Dubois1980] Didier Dubois et Henri Prade. *Systems of linear fuzzy constraints*. Fuzzy Sets and Systems, vol. 3, no. 1, pages 37–48, January 1980.
- [Dubois1997] Didier Dubois et Henri Prade. *The three semantics of fuzzy sets*. Fuzzy Sets and Systems, vol. 90, no. 2, pages 141–150, September 1997.
- [Dubois2015] Didier Dubois et Henri Prade. *The legacy of 50 years of fuzzy sets : A discussion*. Fuzzy Sets and Systems, vol. 281, pages 21–31, December 2015.
- [Duclos1998] Alain Duclos. *Étude des conditions de départ d’avalanches de plaques : une méthode, un outil, des enseignements / Alain Duclos ; sous la direction de Michel Chardon*. Thèse de Doctorat, Thèse de doctorat Géographie Grenoble 1 1998, 1998.
- [Duclos2012] Alain Duclos. *The new challenge is no more to improve prediction, but to better manage the unexpected*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Anchorage, Alaska, USA, page 6, 2012.

- 
- [Durand1993] Y. Durand, E. Brun, L. Merindol, G. Guyomarc'h, B. Lesaffre et E. Martin. *A meteorological estimation of relevant parameters for snow models*. Annals of Glaciology, vol. 18, pages 65–71, 1993.
- [Durand1999] Y. Durand, G. Giraud, E. Brun, L. Méridol et E. Martin. *A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting*. Journal of Glaciology, vol. 45, no. 151, pages 469–484, 1999.
- [EAWS2021a] European Avalanche Warning Services EAWS. *Standards : Avalanche size*, 2021. Disponible sur : <https://www.avalanches.org/standards/avalanche-size/> (consulté le 31/03/2022).
- [EAWS2021b] European Avalanche Warning Services EAWS. *Standards : European Avalanche Danger Scale*, 2021. Disponible sur : <https://www.avalanches.org/standards/avalanche-danger-scale/> (consulté le 31/03/2022).
- [Engler2001] Martin Engler. *SnowCard & Faktorencheck Lawinenkunde vom Anfänger bis zum Profi*. Berg und steigen, vol. 4, pages 37–41, 2001.
- [Escande2010] Sébastien Escande. *Cartographie et données historiques sur les avalanches*. page 27, 2010.
- [Ezugwu2022] Absalom E. Ezugwu, Abiodun M. Ikotun, Olaide O. Oyelade, Laith Abualigah, Jeffery O. Agushaka, Christopher I. Eke et Andronicus A. Akinyelu. *A comprehensive survey of clustering algorithms : State-of-the-art machine learning applications, taxonomy, challenges, and future research prospects*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 110, page 104743, April 2022.
- [Floyer2018] James A. Floyer et Mark A. Bender. *The Dangerator : a method for estimating avalanche danger in areas with no public avalanche forecast*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Innsbruck, Austria, pages 1279–1283, October 2018.
- [Fredston1994] Jill Fredston, Doug Fesler et Bruce Tremper. *THE HUMAN FACTOR - LESSONS FOR AVALANCHE EDUCATION*. iSSW, page 15, 1994.
- [Frey2007] Brendan J. Frey et Delbert Dueck. *Clustering by Passing Messages Between Data Points*. Science, vol. 315, no. 5814, pages 972–976, February 2007.
- [Furman2010] Nate Furman, Wynn Shooter et Scott Schumann. *The Roles of Heuristics, Avalanche Forecast, and Risk Propensity in the Decision Making of Backcountry Skiers*. Leisure Sciences, vol. 32, no. 5, 2010.
- [Fyffe2006] Blair Fyffe. *Mechanisms of snow slab avalanche release*. Thèse de Doctorat, 2006.
- [Föhn1987] Paul M B Föhn. *The "Rutschblock" as a practical tool for slope stability evaluation*. International Association of Hydrological Sciences Publication 162 (Symposium at Davos 1986 – Avalanche formation, Movements and Effects), pages 223–228, 1987.
- [Gaume2017a] Johan Gaume, Alec van Herwijnen, Guillaume Chambon, Nander Wever et Jürg Schweizer. *Snow fracture in relation to slab avalanche release : critical state for the onset of crack propagation*. The Cryosphere, vol. 11, no. 1, pages 217–228, January 2017.
-

- [Gaume2017b] Johan Gaume et Benjamin Reuter. *Assessing snow instability in skier-triggered snow slab avalanches by combining failure initiation and crack propagation*. Cold Regions Science and Technology, vol. 144, pages 6–15, December 2017.
- [Gaume2018a] Johan Gaume, Guillaume. Chambon, Alec van Herwijnen et Jürg Schweizer. *Stress Concentrations in Weak Snowpack Layers and Conditions for Slab Avalanche Release*. Geophysical Research Letters, vol. 45, no. 16, pages 8363–8369, 2018.
- [Gaume2018b] Johan Gaume, Theodore Gast, Joseph Teran, Alec van Herwijnen et Chenfanfu Jiang. *Dynamic anticrack propagation in snow*. Nature Communications, vol. 9, no. 1, pages 1–10, August 2018.
- [Gaume2018c] Johan Gaume, Theodore Gast, Joseph Teran, Alec van Herwijnen et Chenfanfu Jiang. *Unified modeling of the release and flow of snow avalanches using the Material Point Method*. August 2018.
- [Gauthier2010] Dave Gauthier. *Evaluation of the Avaluator Decision-Support Tool for Canadian Accidents : 1997-2009*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Lake Tahoe, California, USA, pages 489–496, 2010.
- [Ghinoi2005] Alessandro Ghinoi et Chang-Jo Chung. *STARTER : A statistical GIS-based model for the prediction of snow avalanche susceptibility using terrain features - Application to Alta Val Badia, Italian Dolomites*. Geomorphology, vol. 66, pages 305–325, March 2005.
- [Giraud1992] G Giraud. *MEPRA : an expert system for avalanche risk forecasting*. Proceedings of the International snow science workshop, Breckenridge, Colorado, USA, pages 97–106, 1992.
- [Gruber2001] Urs Gruber et Stefan Margreth. *Winter 1999 : a valuable test of the avalanche-hazard mapping procedure in Switzerland*. Annals of Glaciology, vol. 32, pages 328–332, 2001.
- [Guyomarc’H2012] G. Guyomarc’H, H. Bellot, Y. Durand, F. Naaim-Bouvet, A. Prokop et V. Vionnet. *Measurement campaigns to investigate blowing snow and snow drift conditions at a high altitude site*. page p. 961, September 2012.
- [Guyomarc’H2013] G. Guyomarc’H, Y. Durand, G. Giraud et F. Naaim-Bouvet. *Intégration d’un schéma de transport de neige par le vent dans la chaîne opérationnelle française de prévision du risque d’avalanches*. In International Snow Science Workshop (ISSW), International Snow Science Workshop (ISSW 2013), Grenoble Chamonix-Mont-Blanc, France, October 7-11, 2013 : a merging of theory and practice. Florence Naaim-Bouvet, Yves Durand, Richard Lambert (ed.), pages p. 92 – p. 98, Grenoble - Chamonix Mont-Blanc, France, October 2013. Irstea, ANENA, Meteo France.
- [Haegeli2006] Pascal Haegeli, Ian McCammon, Bruce Jamieson, Clair Israelson et Grant Statham. *The Avaluator – A Canadian Rule-Based Avalanche Decision Support Tool for Amateur Recreationists*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Telluride, Colorado, USA, pages 254–263, 2006.
- [Haegeli2010] Pascal Haegeli. *Avaluator Avalanche Accident Prevention Card – Second Edition (v2.0)*. Revelstoke, BC :Canadian Avalanche Centre., 2010.

- 
- [Hallandvik2012] Linda Hallandvik, Stian Langeland et Magnus Berger Skj. *COULD FATAL AVALANCHE ACCIDENTS IN NORWAY FROM 2005 – 2012 BEEN PREVENTED USING THE REDUCTION METHOD, THE BASIC REDUCTION METHOD AND THE ALPTRUTH METHOD?* Proceedings, International Snow Science Workshop, Anchorage, Alaska, page 6, 2012.
- [Hallandvik2017] Linda Hallandvik, Marit Svarstad Andresen et Eivind Aadland. *Decision-making in avalanche terrain—How does assessment of terrain, reading of avalanche forecast and environmental observations differ by skiers' skill level?* Journal of Outdoor Recreation and Tourism, vol. 20, pages 45–51, December 2017.
- [Harbitz1998] Carl Harbitz, Dieter Issler et Chris Keylock. *Conclusions from a recent survey of avalanche computational models.* pages 128–135, May 1998.
- [Harvey2002] Stephan Harvey. *Merkblatt „Reduktion des Lawinenrisikos“.* SAC, page 2, 2002.
- [Harvey2009a] Stephan Harvey et Paul Nigg. *Practical risk assessment and decision making in avalanche terrain. An overview of concepts and tools in Switzerland.* Proceedings of the International Snow Science Workshop, Davos, Switzerland, page 5, 2009.
- [Harvey2009b] Stephan Harvey, J. Schweizer, Hansueli Rhyner, Paul Nigg et B. Hasler. *Attention avalanches! Groupe de compétence "prévention des accidents d'avalanche"*, 2009.
- [Harvey2018a] Stephan Harvey, Hansueli Rhyner, Lukas Dürr et Hans Martin Henny. *To go or not to go : Decision making at individual slope.* Proceedings of the International Snow Science Workshop, Innsbruck, Austria, pages 1346–1350, October 2018.
- [Harvey2018b] Stephan Harvey, Günter Sch mudlach, Yves Bühler, Lukas Dürr, Andreas Stoffel et Marc Christen. *Avalanche terrain maps for backcountry skiing in Switzerland.* page 7, 2018.
- [Harvey2018c] Stephan Harvey, Jürg Schweizer, Hansueli Rhyner, Paul Nigg et Bruno Hasler. *Attention avalanches! - Groupe de compétence "prévention des accidents d'avalanche"*, 2018.
- [Heierli2008] Joachim Heierli. *Anticrack Model for Slab Avalanche Release.* Thèse de Doctorat, Fakultät für Maschinenbau Universität Karlsruhe, 2008.
- [Huang2017] Mingming Huang, Runsheng Lin, Shuai Huang et Tengfei Xing. *A novel approach for precipitation forecast via improved K-nearest neighbor algorithm.* Advanced Engineering Informatics, vol. 33, pages 89–95, August 2017.
- [Hutter2021] Veronika Hutter, Frank Techel et Ross S. Purves. *How is avalanche danger described in textual descriptions in avalanche forecasts in Switzerland? Consistency between forecasters and avalanche danger.* Natural Hazards and Earth System Sciences, vol. 21, no. 12, pages 3879–3897, December 2021.
- [Höllner2018] Peter Höllner. *Are strategic methods sufficient for an adequate assessment of avalanche danger? - the state of facts in the case of a judicial procedure.* Proceedings of the International Snow Science Workshop, Innsbruck, Austria, pages 1264–1266, October 2018.
-

- [Ioannou2003] Irina Ioannou. *Mise en oeuvre d'une approche symbolique floue pour la maîtrise de la qualité des produits alimentaires par contrôle du procédé*. These de doctorat, Clermont-Ferrand 2, January 2003.
- [Irannezhad2017] Masoud Irannezhad, Anna-Kaisa Ronkanen, Sepideh Kiani, Deliang Chen et Bjørn Kløve. *Long-term variability and trends in annual snow-fall/total precipitation ratio in Finland and the role of atmospheric circulation patterns*. Cold Regions Science and Technology, vol. 143, pages 23–31, November 2017.
- [Jaedicke2001] Christian Jaedicke. *Acoustic snowdrift measurements : experiences from the FlowCapt instrument*. Cold Regions Science and Technology, vol. 32, no. 1, pages 71–81, March 2001.
- [Jamieson1996] Bruce Jamieson et Torsten Geldsetzer. *Avalanche Accidents in Canada, Volume 4 : 1984-1996*, Canadian Avalanche Assoc., Revelstoke, BC., 1996.
- [Jamieson2008] Bruce Jamieson, Stefan Margreth et Alan Jones. *Application and Limitations of Dynamic Models for Snow Avalanche Hazard Mapping*. Proceedings Whistler 2008 International Snow Science Workshop September 21-27, 2008, page 730, September 2008.
- [Jamieson2010] Bruce Jamieson, Pascal Haegeli et Grant Statham. *Which OBS for which avalanche type ?* Proceedings of the 2010 international snow science workshop, Squaw Valley, CA., pages 155–161, 2010.
- [Johnson2000] Ben Johnson et Bruce Jamieson. *Field data and theory for human-triggered “whumpfs” and remote avalanches*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Big Sky, Montana, USA, 2000.
- [Josse2009] Julie Josse, François Husson et Jérôme Pagès. *Gestion des données manquantes en Analyse en Composantes Principales*. Journal de la société française de statistique, vol. 150, no. 2, pages 28–51, 2009.
- [Kahneman2012] Daniel Kahneman. *Thinking, fast and slow / Daniel Kahneman*. Penguin books, London, 2012.
- [Kahneman2021] Daniel Kahneman. *Noise : pourquoi nous faisons des erreurs de jugement et comment les éviter / Daniel Kahneman, ... Olivier Sibony, Cass R. Sunstein ; traduit de l'anglais (États-Unis) par Christophe Jaquet ; avec le concours d'Olivier Sibony*. Odile Jacob, Paris, 2021.
- [Karas2022] Anna Karas, Fatima Karbou, Sophie Giffard-Roisin, Philippe Durand et Nicolas Eckert. *Automatic Color Detection-Based Method Applied to Sentinel-1 SAR Images for Snow Avalanche Debris Monitoring*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 60, pages 1–17, 2022.
- [Klement2004] Erich Peter Klement, Radko Mesiar et Endre Pap. *Triangular norms. Position paper I : basic analytical and algebraic properties*. Fuzzy Sets and Systems, vol. 143, no. 1, pages 5–26, April 2004.
- [Kohonen1998] Teuvo Kohonen. *The self-organizing map*. Neurocomputing, vol. 21, no. 1, pages 1–6, November 1998.
- [Kronholm2002] Kalle Kronholm, Iiirg Schweizer et Martin Schneebeli. *Spatial variability of snow stability on small slopes*. ISSW International Snow Science Workshop, Penticton, B.C., page 6, 2002.
- [Kronthaler2006] Georg Kronthaler et Bernhard Zenk. *Diagnostic du manteau neigeux pour l'estimation du danger d'avalanche*. Berg und steigen, pages 1–9, 2006.

- 
- [Kronthaler2013] Georg Kronthaler, Christoph Mitterer, Bernhard Zenke et Michael Lehning. *The Systematic Snow Cover Diagnosis : A Process-Based Approach for Avalanche Danger Assessment*. International Snow Science Workshop, Grenoble – Chamonix Mont-Blanc, France, pages 199–202, October 2013.
- [Kronthaler2014] Georg Kronthaler et Christoph Mitterer. *The Systematic Snow Cover Analysis : a Practical Tool for Interpreting and Assessing Slope Stability*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Banff, Alberta, Canada, 2014.
- [Kronthaler2019] Georg Kronthaler. *20 Jahre „Systematische Schneedeckendiagnose“*. Berg und steigen, no. 106, pages 16–27, 2019.
- [Lafaysse2013] Matthieu Lafaysse, Samuel Morin, Cécile Coléou, Matthieu Vernay, Damien Serça, François Besson, Jean-Marie Willemet, Gérald Giraud et Yves Durand. *Towards a new chain of models for avalanche hazard forecasting in French mountain ranges, including low altitude mountains*. page 4, 2013.
- [Landrø2018] Markus Landrø et Gerit Pfuhl. *Analysis of decision-making frameworks for avalanche terrain*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Innsbruck, Austria, pages 1284–1288, 2018.
- [Landrø2020a] Markus Landrø, Audun Hetland, Rune Verpe Engeset et Gerit Pfuhl. *Avalanche decision-making frameworks : Factors and methods used by experts*. Cold Regions Science and Technology, vol. 170, page 102897, February 2020.
- [Landrø2020b] Markus Landrø, Gerit Pfuhl, Rune Engeset, Miriam Jackson et Audun Hetland. *Avalanche decision-making frameworks : Classification and description of underlying factors*. Cold Regions Science and Technology, vol. 169, page 102903, January 2020.
- [Larcher1999] Michael Larcher. *Stop or Go Entscheidungsstrategie für Tourengerher*. Berg und steigen, vol. 4, pages 18–23, 1999.
- [Larcher2001] Michael Larcher. *Stop or Go Aktueller Stand und Aussicht*. Berg und steigen, vol. 4, pages 42–45, 2001.
- [Lazar2016] Brian Lazar, Simon Trautman, Mike Cooperstein, Ethan Greene et Karl Birkeland. *North American Avalanche Danger Scale : Are Public Backcountry Forecasters Applying it Consistently?* International Snow Science Workshop 2016 Proceedings, Breckenridge, CO, USA, pages 457–465, October 2016.
- [Lehning2002] M Lehning, F Naaim, M Naaim, B Brabec, J Doorschot, Y Durand et G Guyomarc’H. *Snow drift : acoustic sensors for avalanche warning and research*. page 9, 2002.
- [Lehning2008] Michael Lehning et Charles Fierz. *Assessment of snow transport in avalanche terrain*. Cold Regions Science and Technology, vol. 51, no. 2, pages 240–252, February 2008.
- [Lemus-Canovas2019] Marc Lemus-Canovas, Joan A. Lopez-Bustins, Laura Trapero et Javier Martin-Vide. *Combining circulation weather types and daily precipitation modelling to derive climatic precipitation regions in the Pyrenees*. Atmospheric Research, vol. 220, pages 181–193, May 2019.
- [Lied1980] K. Lied et K. Bakkehøi. *Empirical Calculations of Snow–Avalanche Run–out Distance Based on Topographic Parameters*. Journal of Glaciology, vol. 26, no. 94, pages 165–177, 1980.
-

- [Louchet2020] Francois Louchet. *Snow Avalanches : Beliefs, Facts, and Science*. OUP Oxford, Oxford ; New York, NY, December 2020.
- [Maggioni2002] M. Maggioni et U. Gruber. *The Influence of Topographic Parameters on Avalanche Release Dimension and Frequency*. 2002 International Snow Science Workshop, Penticton, British Columbia, pages 97–104, 2002.
- [Maggioni2018] Margherita Maggioni, Eloïse Bovet, Michele Freppaz, Valerio Segor et Yves Bühler. *Potential of automated avalanche dynamic simulations for large scale hazard indication mapping in Italy : a first test application in Aosta Valley*. International snow science workshop proceedings 2018, pages 736–739, 2018.
- [Marsala1995] Christophe Marsala. *Fuzzy Partition Inference Over a Set of Numerical Values*. In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, page 13, 1995.
- [Mases1995] M. Mases, L. Buisson, W. Good et J. M. Vilaplana. *Etude de la répartition spatiale des effets du transport de neige par le vent ; premiers travaux réalisés à partir de mesures systématiques sur le terrain*. La Houille Blanche, no. 5-6, pages 50–55, August 1995.
- [Mauris1996] Gilles Mauris, Eric Benoit et Laurent Foulloy. *The aggregation of complementary information via fuzzy sensors*. Measurement, vol. 17, no. 4, pages 235–249, April 1996.
- [Mauris1997] Gilles Mauris, Eric Benoit et Laurent Foulloy. *Fuzzy sensors : an overview, Information Engineering : a guided tour of Applications*. pages 13–30, 1997. Eds. Dubois D., Prade H., Yager R.R., John Wiley and Sons.
- [McCammon2000] Ian McCammon. *The role of training in recreational avalanche accidents in the United States*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Big Sky, Montana, USA, pages 37–45, 2000.
- [Mccammon2002] Ian Mccammon et Juerg Schweizer. *A field method for identifying structural weaknesses in the snowpack*. pages 477–481, January 2002.
- [McCammon2004a] Ian McCammon. *Heuristic traps in recreational avalanche accidents : Evidence and implications, Avalanche News (68) :42–50*. Avalanche News, no. 68, 2004.
- [Mccammon2004b] Ian Mccammon et Pascal Haegeli. *Comparing avalanche decision frameworks using accident data from the United States*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Jackson Hole, Wyoming, USA, January 2004.
- [McCammon2006a] Ian McCammon. *Obvious Clues Method : A User’s Guide*. The Avalanche Review, vol. 25, no. 2, 2006.
- [Mccammon2006b] Ian Mccammon et Pascal Haegeli. *Evaluation of a rule-based decision aid for recreational travelers in avalanche terrain*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Telluride, Colorado, USA, page 10, 2006.
- [McCammon2009a] Ian D. McCammon. *Human factors in avalanche accidents : Evolution and interventions*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Davos, Switzerland, pages 644–648, 2009.
- [McCammon2009b] Story Ian McCammon. *38° Revisited : A Closer Look at Avalanche Types & Slope Angles*. The Avalanche Review, vol. 27, no. 4, page 2, 2009.

- 
- [McClung1980] David M McClung et Peter A Schaerer. *SNOW AVALANCHE SIZE CLASSIFICATION*. ISSW, page 19, 1980.
- [McClung1991] D. M. McClung et A. I. Mears. *Extreme value prediction of snow avalanche runout*. Cold Regions Science and Technology, vol. 19, no. 2, pages 163–175, May 1991.
- [Mcclung1996] David M. Mcclung et Jurg Schweizer. *Effect of Snow Temperatures on Skier Triggering of Dry Slab Avalanches*. pages 113–117, 1996.
- [McClung2000] David M. McClung. *Extreme avalanche runout in space and time*. Can. Geotech. J., vol. 37, pages 161–170, 2000.
- [MEDDE2015] Ministère de l'écologie MEDDE du développement durable et de l'énergie. *Guide méthodologique, Plan de prévention des risques naturels, Avalanches*, 2015.
- [Meng2016] Jun Meng, Han Hao et Yushi Luan. *Classifier ensemble selection based on affinity propagation clustering*. Journal of Biomedical Informatics, vol. 60, pages 234–242, April 2016.
- [Michaux2002] J.-L. Michaux, F. Naaim-Bouvet, M. Naaim, M. Lehning et G. Guyomarc'H. *Effect of unsteady wind on drifting snow : first investigations*. Natural Hazards and Earth System Science, vol. 2, no. 3/4, page 129, 2002.
- [Moner2013] Ivan Moner, Sara Orgué, Jordi Gavaldà et Montse Bacardit. *How big is big : results of the avalanche size classification survey*. International Snow Science Workshop Grenoble – Chamonix Mont-Blanc - October 07-11, 2013, pages 242–246, 2013.
- [Monti2016] Fabiano Monti, Johan Gaume, Alec van Herwijnen et Jürg Schweizer. *Snow instability evaluation : calculating the skier-induced stress in a multi-layered snowpack*. Natural Hazards and Earth System Sciences, vol. 16, no. 3, pages 775–788, March 2016.
- [Munter2003] Werner Munter. *Lawinen 3 X 3 Risikomanagement im Wintersport*. Pohl & Schellhammer 3. Auflage Garmisch - Partenkirchen 2003, 2003.
- [Munter2006] Werner Munter. *3 x 3 avalanches : la gestion du risque dans les sports d'hiver*. Editions du Club Alpin Suisse, Suisse, 2006.
- [Munter2009] Werner Munter. *Der Nivocheck Ein neues Werkzeug zum Einschätzen der lokalen Gefahrenstufe in der praktischen Lawinenkunde*. Berg und steigen, vol. 4, pages 62–65, 2009.
- [Murtagh2014] F. Murtagh et P. Legendre. *Ward's Hierarchical Agglomerative Clustering Method : Which Algorithms Implement Ward's Criterion ?* J. Clas-sif., 2014.
- [Météorisk2018] Météorisk. *NivoTest : l'application mobile.*, 2018.
- [Müller2016a] Karsten Müller, Christoph Mitterer, Rune Engeset, Ragnar Ekker et Solveig Ø Kosberg. *COMBINING THE CONCEPTUAL MODEL OF AVALANCHE HAZARD WITH THE BAVARIAN MATRIX*. page 8, 2016.
- [Müller2016b] Karsten Müller, Thomas Stucki, Christoph Mitterer, Patrick Nairz, Hans Konetschny, Cecile Coleou, Flavio Berbenni et Igor Chiambretti. *TOWARDS AN IMPROVED EUROPEAN AUXILIARY MATRIX FOR ASSESSING AVALANCHE DANGER LEVELS*. page 3, 2016.
- [Naaim-Bouvet2002] F. Naaim-Bouvet et M. Naaim. *Transport éolien de la neige : Processus physiques et modélisations*. Cemagref Editions, 2002.
-

- [Naaïm-Bouvet2010] Florence Naaim-Bouvet, Hervé Bellot et Mohamed Naaim. *Back analysis of drifting-snow measurements over an instrumented mountainous site*. Annals of Glaciology, vol. 51, no. 54, pages 207–217, 2010.
- [Naaïm-Bouvet2012] Florence Naaim-Bouvet, Gilbert Guyomarc'h, Mohamed Naaim, Yves Durand, Hervé Bellot et Philippe Pugliese. *Transport de neige par le vent sur un site de haute montagne : de la modélisation à l'observation, de l'observation à la modélisation*. La Houille Blanche, no. 1, pages 51–57, February 2012.
- [Ngueïlbaye2021] Alladoubaye Ngueïlbaye, Hongzhi Wang, Daouda Ahmat Mahamat et Sahalu B. Junaidu. *Modulo 9 model-based learning for missing data imputation*. Applied Soft Computing, vol. 103, page 107167, May 2021.
- [Pagnier2021] Fanny Pagnier, Didier Coquin, Frédéric Pourraz, Hervé Verjus et Gilles Mauris. *Classification des précipitations sur les massifs alpins français*. In ORASIS 2021, Saint Ferréol, France, September 2021.
- [Perla1977] Ron Perla. *Slab avalanche measurements*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 14, pages 206–213, 1977.
- [Pfeifer2008] Christian Pfeifer. *On probabilities of avalanches triggered by alpine skiers. An empirically driven decision strategy for backcountry skiers based on these probabilities*. Natural Hazards, vol. 48, pages 425–438, 2008.
- [Pfeifer2018] Christian Pfeifer et Thomas Fetz. *Merging decision strategies for backcountry skiers in avalanche terrain using fuzzy logic and imprecise probability theory*. International Snow Science Workshop Proceedings 2018, Innsbruck, Austria, pages 1320–1322, 2018.
- [Pourraz2017] Frédéric Pourraz, Hervé Verjus et Gilles Mauris. *Visual analytics for aiding decisions of ski touring itinerary in a risky snow avalanche environment*. IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications (CIVEMSA), July 2017.
- [Pourraz2019] Frédéric Pourraz, Fanny Pagnier, Hervé Verjus et Alain Duclos. *Définition de l'approche et des outils méthodologiques*. Rapport technique WP2.a.V1 – Livrable 2.1.1, September 2019.
- [Pourraz2021] Frédéric Pourraz et Alain Duclos. *Conception et développement du prototype*. Rapport technique WP2.b.V2 – Livrable 2.5.1, April 2021.
- [Pourraz2022] Frédéric Pourraz et Alain Duclos. *Conception et développement du prototype*. Rapport technique WP2.b.V3 – Livrable 2.6.1, April 2022.
- [Praene2019] Jean Philippe Praene, Bruno Malet-Damour, Mamy Harimisa Radanielina, Ludovic Fontaine et Garry Rivière. *GIS-based approach to identify climatic zoning : A hierarchical clustering on principal component analysis*. Building and Environment, vol. 164, page 106330, October 2019.
- [Rapin2002] François Rapin. *A New Scale for Avalanche Intensity*. 2002 International Snow Science Workshop, Penticton, British Columbia, pages 90–96, 2002.
- [Richman2010] Michael B. Richman et Indra Adrianto. *Classification and regionalization through kernel principal component analysis*. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, vol. 35, no. 9, pages 316–328, January 2010.

- 
- [Rossi2009] Giovanni Rossi et Birgitta Berglund. *Measurement related to human perception and interpretation - State of the art and challenges*. 19th IMEKO World Congress 2009, vol. 4, January 2009.
- [Sampl2004] Peter Sampl et Thomas Zwinger. *Avalanche simulation with SAMOS*. Annals of Glaciology, vol. 38, pages 393–398, 2004.
- [Sampl2009] Peter Sampl, Matthias Granig et Stabstelle Lawinensimulation. *Avalanche Simulation with SAMOS-AT*. page 6, 2009.
- [Sato1993] Takeshi Sato, Tadashi Kimura, Taminoe Ishimaru et Toshisuke Maruyama. *Field test of a new snow-particle counter (SPC) system*. Annals of Glaciology, vol. 18, pages 149–154, 1993.
- [Schauer2021] Andrew Schauer, Jordy Hendrikx, Karl Birkeland et Cary Mock. *Synoptic atmospheric circulation patterns associated with deep persistent slab avalanches in the western United States*. Natural Hazards and Earth System Sciences, vol. 21, pages 757–774, February 2021.
- [Schernthanner2007] H Schernthanner. *Fuzzy Logic Method for Landslide Susceptibility Mapping, “Rio Blanco”, Nicaragua*. Proceedings of 9th International Conference on GeoComputation, National Centre for Geocomputation, National University of Ireland, Maynooth, Eire., page 5, September 2007.
- [Schmidtner2018] Korbinian Schmidtner, Perry Bartelt, Jan-Thomas Fischer, Rudolf Sailer, Matthias Granig, Peter Sampl, Wolfgang Fellin, Lukas Stoffel, Marc Christen et Yves Bühler. *Comparison of powder snow avalanche simulation models (RAMMS and SamosAT) based on reference events in Switzerland*. International Snow Science Workshop Proceedings 2018, Innsbruck, Austria, pages 740–745, October 2018.
- [Schmudlach2016a] Günter Schmudlach et Jochen Köhler. *Automated avalanche risk rating of backcountry ski routes*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Breckenridge, Colorado, USA, 2016.
- [Schmudlach2016b] Günter Schmudlach et Jochen Köhler. *Method for an Automated Avalanche Terrain Classification*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Breckenridge, Colorado, USA, pages 729–736, October 2016.
- [Schmudlach2018] Günter Schmudlach, Kurt Winkler et Jochen Köhler. *Quantitative risk reduction method (QRM), a data-driven avalanche risk estimator*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Innsbruck, Austria, pages 1272–1278, 2018.
- [Schweizer2001a] J. Schweizer et J. B. Jamieson. *Snow cover properties for skier triggering of avalanches*. Cold Regions Science and Technology, vol. 33, no. 2, pages 207–221, December 2001.
- [Schweizer2001b] Jürg Schweizer et Martina Lutschg. *Characteristics of human-triggered avalanches*. Cold Regions Science and Technology, vol. 33, no. 2, pages 147–162, December 2001.
- [Schweizer2002] Juerg Schweizer. *The Rutschblock test - Procedure and application in Switzerland*. The Avalanche Review, vol. 20, pages 1,14–15, January 2002.
- [Schweizer2003] Juerg Schweizer, Bruce Jamieson et Martin Schneebeli. *Snow avalanche formation*. Reviews of Geophysics, vol. 41, page 1016, December 2003.
-

- [Schweizer2006] Juerg Schweizer. *SPATIAL VARIABILITY – SO WHAT*. ISSW International Snow Science Workshop, Telluride CO, U.S.A, page 12, 2006.
- [Schweizer2007] Jürg Schweizer et Kalle Kronholm. *Snow cover spatial variability at multiple scales : Characteristics of a layer of buried surface hoar*. Cold Regions Science and Technology, vol. 47, no. 3, pages 207–223, March 2007.
- [Schweizer2008] Jürg Schweizer, Kalle Kronholm, J. Bruce Jamieson et Karl W. Birkeland. *Review of spatial variability of snowpack properties and its importance for avalanche formation*. Cold Regions Science and Technology, vol. 51, no. 2-3, pages 253–272, February 2008.
- [Schweizer2010a] Juerg Schweizer et Bruce Jamieson. *On surface warming and snow instability*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Lake Tahoe, California, USA, pages 619–622, 2010.
- [Schweizer2010b] Jürg Schweizer et Bruce Jamieson. *Snowpack tests for assessing snow-slope instability*. Annals of Glaciology, vol. 51, no. 54, pages 187–194, 2010.
- [Schweizer2013] Juerg Schweizer, Bruce Jamieson et B. Reuter. *How surface warming affects dry-snow instability*. The Avalanche Review, vol. 31, pages 25–31, January 2013.
- [Schweizer2018] Juerg Schweizer, Christoph Mitterer, Frank Techel, Andreas Stoffel et B. Reuter. *QUANTIFYING THE OBVIOUS : THE AVALANCHE DANGER LEVEL*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Innsbruck, Austria, October 2018.
- [Shandro2018] Bret Shandro et Pascal Haegeli. *Characterizing the nature and variability of avalanche hazard in western Canada*. Natural Hazards and Earth System Sciences, vol. 18, no. 4, pages 1141–1158, April 2018.
- [Sivardière2009] François Sivardière. *Avalanches : Connaître et comprendre pour limiter le risque*. Glénat Livres, Grenoble, November 2009.
- [Skitoureguru2019] Skitoureguru. *Introduction "Skitoureguru"*, 2019.
- [SLF2017] SLF. *Avalanche Bulletin Interpretation Guide. Edition December 2017*. WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, page 53, 2017.
- [SLF2018] SLF. *Avalanche Bulletin Interpretation Guide. Edition November 2018*. WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, page 52, 2018.
- [SLF2019] SLF. *Avalanche Bulletin Interpretation Guide. Edition December 2019*. WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, page 52, 2019.
- [Smits2017] Grégory Smits, Olivier Pivert et Marie-Jeanne Lesot. *Vocabulary elicitation for informative descriptions of classes | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore*. 17th World Congress of International Fuzzy Systems Association and 9th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (IFSA-SCIS), page 8, 2017.
- [Statham2006] Grant Statham, Bruce McMahon et Ian Tømm. *The Avalanche Terrain Exposure Scale*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Telluride, Colorado, USA, pages 491–497, 2006.
- [Statham2008] Grant Statham. *Avalanche Hazard, Danger and Risk - A Practical Explanation*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Whistler, British Columbia, Canada, pages 224–227, September 2008.

- 
- [Statham2010] Grant Statham, Pascal Haegeli, Karl W. Birkeland, Ethan Greene, Clair Israelson, Bruce Tremper, Chris Stethem, Bruce McMahon, Brad White et John Kelly. *A Conceptual Model of Avalanche Hazard*. 2010 International Snow Science Workshop, page 686, 2010.
- [Statham2012] Grant Statham, Scott Campbell et Karl Klassen. *The Avalx Public Avalanche Forecasting System*. 2012.
- [Statham2018a] Grant Statham, Pascal Haegeli, Ethan Greene, Karl Birkeland, Clair Israelson, Bruce Tremper, Chris Stethem, Bruce McMahon, Brad White et John Kelly. *A conceptual model of avalanche hazard*. *Natural Hazards*, vol. 90, no. 2, pages 663–691, January 2018.
- [Statham2018b] Grant Statham, Stephen Holeczi et Bret Shandro. *CONSISTENCY AND ACCURACY OF PUBLIC AVALANCHE FORECASTS IN WESTERN CANADA*. October 2018.
- [Stoffel2018] Lukas Stoffel, Perry Bartelt, Stefan Margreth et Jürg Schweizer. *Can scenario-based avalanche dynamics calculations help in the decision making process for road closures?* International snow science workshop proceedings 2018, pages 772–777, 2018.
- [Tacnet2010] Jean-Marc Tacnet et Mireille Batton-Hubert. *Analyse multicritères et fusion d'information pour l'expertise et la gestion intégrée des risques naturels en montagne*. Congrès Lambda Mu, October 2010.
- [Techel2018] Frank Techel, Christoph Mitterer, Elisabetta Ceaglio, Cécile Coléou, Samuel Morin, Francesca Rastelli et Ross S. Purves. *Spatial consistency and bias in avalanche forecasts – a case study in the European Alps*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 18, no. 10, pages 2697–2716, October 2018.
- [Techel2020a] Frank Techel. *On consistency and quality in public avalanche forecasting - a data-driven approach to forecast verification and to refining definitions of avalanche danger*. 2020.
- [Techel2020b] Frank Techel, Karl Birkeland, Doug Chabot, Jim Earl, Ivan Moner et Ron Simenhois. *Comparing Extended Column Test results to signs of instability in the surrounding slopes - Exploring a large international data set*. vol. 39, pages 24–25, September 2020.
- [Tremper2001] Bruce Tremper. *Staying Alive in Avalanche Terrain*. Mountaineers Books, Seattle, WA, 2001.
- [Trouvilliez2013] A. Trouvilliez. (*trad auto*)*Observations and modelling of blown snow in Antarctica*. Rapport technique, 2013.
- [Trouvilliez2015] Alexandre Trouvilliez, Florence Naaim-Bouvet, Hervé Bellot, Christophe Genthon et Hubert Gallée. *Evaluation of the FlowCapt Acoustic Sensor for the Aeolian Transport of Snow*. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 32, no. 9, pages 1630–1641, September 2015.
- [Tufféry2012] Stéphane Tufféry. *Data mining et statistique décisionnelle : L'intelligence des données / Stéphane Tufféry,...* Editions Technip, Paris, 4e édition actualisée et augmentée edition, 2012.
- [Uttl2008] Bob Uttl, Jan Uttl et Meaghen Henry. *The Avaluator Avalanche Accident Prevention Card : Facts, Fictions, and Controversies*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Whistler, British Columbia, Canada, 2008.
-

- [Uttl2009a] Bob Uttl, Mekale Kibreab, Kelly Kisinger et Jan Uttl. *Trend Analysis of Canadian Avalanche Accidents : The Avaluator Avalanche Accident Prevention Card Has Not Reduced the Number of Accidents*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Davos, Switzerland, pages 610–613, 2009.
- [Uttl2009b] Bob Uttl, Kelly Kisinger, Mekale Kibreab et Jan Uttl. *Avaluator’s Obvious Clues Prevention Values Are Inflated : Evidence From Canadian Avalanche Accidents*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Davos, Switzerland, page 4, 2009.
- [Uttl2010] Bob Uttl, James Taylor et Jan Uttl. *Pitfalls in Development of Avalanche Accident Risk Reduction Tools*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Lake Tahoe, California, USA, 2010.
- [Uttl2012] Bob Uttl, Joanna McDouall et Christina Mitchell. *Evaluating the Avaluator Avalanche Accident Prevention Card 2.0*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Anchorage, Alaska, USA, pages 840–847, 2012.
- [van Herwijnen2009] Alec van Herwijnen et J. Heierli. *Measurement of crack-face friction in collapsed weak snow layers*. Geophysical Research Letters - GEOPHYS RES LETT, vol. 36, December 2009.
- [Varshney1997] Pramod K. Varshney. *Introduction of the special issue on Data Fusion*. Proceeding of the IEEE, Vol.85, n°1, pages 3–5, 1997.
- [Veitinger2016a] Jochen Veitinger, Ross Stuart Purves et Betty Sovilla. *Potential slab avalanche release area identification from estimated winter terrain : a multi-scale, fuzzy logic approach*. Natural Hazards and Earth System Sciences, vol. 16, no. 10, pages 2211–2225, October 2016.
- [Veitinger2016b] Jochen Veitinger, Betty Sovilla et Yves Bühler. *Assessing the effect of the winter terrain surface on simulations of avalanche scenarios*. 13th congress INTERPRAEVENT 2016. 30 May to 2 June 2016. Lucerne, Switzerland. Extended abstracts &quot;Living with natural risks&quot;, pages 168–169, 2016.
- [Vernay2015] Matthieu Vernay, Matthieu Lafaysse, Laurent Mérindol, Gérald Giraud et Samuel Morin. *Ensemble forecasting of snowpack conditions and avalanche hazard*. Cold Regions Science and Technology, vol. 120, pages 251–262, December 2015.
- [Vionnet2012a] V. Vionnet, E. Brun, S. Morin, A. Boone, S. Faroux, P. Le Moigne, E. Martin et J.-M. Willemet. *The detailed snowpack scheme Crocus and its implementation in SURFEX v7.2*. Geoscientific Model Development, vol. 5, no. 3, pages 773–791, May 2012.
- [Vionnet2012b] Vincent Vionnet. *Études du transport de la neige par le vent en conditions alpines : observations et simulations à l’aide d’un modèle couplé atmosphère/manteau neigeux*. page 249, 2012.
- [Vionnet2014] V. Vionnet, E. Martin, V. Masson, G. Guyomarc’h, F. Naaim-Bouvet, A. Prokop, Y. Durand et C. Lac. *Simulation of wind-induced snow transport and sublimation in alpine terrain using a fully coupled snowpack/atmosphere model*. The Cryosphere, vol. 8, no. 2, pages 395–415, March 2014.
- [Vontobel2013] Irene Vontobel, Stephan Harvey et Ross S Purves. *Terrain analysis of skier-triggered avalanche starting zones*. page 5, 2013.

- 
- [Ward1963] Joe H. Ward. *Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function*. Journal of the American Statistical Association, March 1963.
- [Winkler2013] Kurt Winkler, Martin Bächtold, Stefano Gallorini, Ueli Niederer, Thomas Stucki, Gian Darms, Lukas Dürr, Frank Techel et Benjamin Zweifel. *Swiss avalanche bulletin : automated translation with a catalogue of phrases*. page 5, 2013.
- [Zadeh1965] L. A. Zadeh. *Fuzzy sets*. Information and Control, vol. 8, no. 3, pages 338–353, June 1965.
- [Zadeh1978] L. A. Zadeh. *Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility*. Fuzzy Sets and Systems, vol. 1, no. 1, pages 3–28, January 1978.
- [Zahraie2011] Banafsheh Zahraie et Abbas Roozbahani. *SST clustering for winter precipitation prediction in southeast of Iran : Comparison between modified K-means and genetic algorithm-based clustering methods*. Expert Systems with Applications, vol. 38, no. 5, pages 5919–5929, May 2011.
- [Zhang2022] Wei Zhang, Jianqiao He, An'an Chen, Xuejiao Wu et Yongping Shen. *Observations of Drifting Snow Using FlowCapt Sensors in the Southern Altai Mountains, Central Asia*. Water, vol. 14, no. 6, page 845, January 2022.
- [Zischg2005] A. Zischg, S. Fuchs, M. Keiler et G. Meißl. *Modelling the system behaviour of wet snow avalanches using an expert system approach for risk management on high alpine traffic roads*. Natural Hazards and Earth System Sciences, vol. 5, no. 6, pages 821–832, October 2005.
- [Zweifel2012] Benjamin Zweifel, Frank Techel et Christian Björk. *WHO IS INVOLVED IN AVALANCHE ACCIDENTS ?* page 6, 2012.
- [Zweifel2016] Benjamin Zweifel, Emily Procter, Frank Techel, Giacomo Strapazon et Roman Boutellier. *Risk of Avalanche Involvement in Winter Backcountry Recreation : The Advantage of Small Groups*. Wilderness & Environmental Medicine, vol. 27, no. 2, pages 203–210, June 2016.
- [Zwinger2003] Thomas Zwinger, Alfred Kluwick et Peter Sampl. *Numerical Simulation of Dry-Snow Avalanche Flow over Natural Terrain*. In Kolumban Hutter et Nina Kirchner, editeurs, Dynamic Response of Granular and Porous Materials under Large and Catastrophic Deformations, pages 161–194. Springer, Berlin, Heidelberg, 2003.



## Table des figures

0.1	Pictogrammes européens des différentes situations avalanches typiques . . . . .	4
0.2	Déclenchement d'une avalanche de plaque (Source : schémas réalisés à partir de A. Duclos - Trame formation gestion de risque 2018 ENSA <a href="https://prezi.com/pdji58daggfl/trame-formation-gestion-de-risque-2018-partage-en-sa/?frame=bf704231dc5d9f331cd6ce02aa5426641d3bfca">https://prezi.com/pdji58daggfl/trame-formation-gestion-de-risque-2018-partage-en-sa/?frame=bf704231dc5d9f331cd6ce02aa5426641d3bfca</a> ) . . . . .	6
0.3	Évolution des forces de traction en fonction de la pente . . . . .	6
1.1	Frise chronologique et évolution des méthodes . . . . .	20
1.2	Synthèse de l'analyse comparative des treize méthodes étudiées . . . . .	26
1.3	Détecter, analyser, décider : trois phases de la démarche CRISTAL . . . . .	37
1.4	Représentation schématique du cadre proposé . . . . .	38
2.1	Inclinaison des pentes nécessaire au déclenchement d'avalanches, synthèse de la littérature . . . . .	48
2.2	Fuzzification du sous-critère C2.2 <i>Pentes fréquentées</i> . . . . .	52
2.3	Fuzzification des deux paramètres liés au sous-critère C2.6 <i>Peut emporter le skieur</i> . . . . .	53
2.4	Fuzzification du sous-paramètre C3.1 <sub>3.1</sub> <i>Largeur pente</i> . . . . .	59
2.5	Fuzzification du sous-paramètre C3.1 <sub>3.2</sub> <i>Largeur avalanche</i> selon la largeur de la pente . . . . .	59
2.6	Fuzzification du sous-paramètre C3.1 <sub>3.3</sub> <i>Épaisseur avalanche</i> . . . . .	60
2.7	Synthèse illustrée de la décomposition des critères en sous-critères . . . . .	70
2.8	Détecter, analyser, décider : trois phases de la démarche CRISTAL . . . . .	72
3.1	Identification des critères, sous-critères et paramètres faisant l'objet de cette section . . . . .	74
3.2	Schéma représentant les métriques exploitées par les modèles Alpha-Beta et Runout-Ratio . . . . .	76
3.3	Emprise d'une avalanche : photographie et détourage de l'enveloppe . . . . .	76
3.4	Représentation schématique des différentes métriques calculées . . . . .	77
3.5	Extraction du tracé principal d'une avalanche (rouge et orange) et point limite (blanc) : exemples . . . . .	78
3.6	Extraction de l'enveloppe principale d'une avalanche . . . . .	79
3.7	Extraction du tracé principal d'une avalanche : principe . . . . .	79
3.8	Extraction du point limite . . . . .	80
3.9	Régression linéaire entre $D$ et $d + d'$ . . . . .	81
3.10	Régressions itératives . . . . .	81
3.11	Fuzzification dynamique de la distance d'arrêt des avalanches . . . . .	81
3.12	Identification des critères, sous-critères et paramètres faisant l'objet de cette section . . . . .	86
3.13	Représentation simplifiée du processus de classification multi-niveaux . . . . .	91
3.14	Classification (ACP → CAH → K-means) . . . . .	92
3.15	Principales composantes de l'ACP et localisation géographique des stations, exemple de la saison hivernale 2012-2013 . . . . .	93
3.16	Représentation détaillée du processus de classification multi-niveaux . . . . .	94
3.17	Illustration de la notion de <i>profil de précipitations</i> (08 janvier 2018) . . . . .	96

3.18	Classification multi-niveaux appliquée à nos données . . . . .	99
3.19	Visualisation des profils réduits moyens des classes obtenues en sortie du processus de classification multi-niveaux et identification des étendues principalement affectées par les précipitations (points blancs : peu ou pas de précipitations ; points foncés : cumuls de précipitations élevés) . . . . .	99
3.20	Classification (ACP → K-means) sur le jeu de données complet (i.e., 12 saisons hivernales), avec $k = 4$ . . . . .	100
3.21	Cumuls de précipitations et profils des 08 et 09 janvier 2018 . . . . .	101
3.22	Représentation schématique d'un jeu de données avec donnée manquante . . . . .	101
3.23	Trois zones graduelles (rouge, jaune et vert) pour chaque tendance détectée, et direction du vent (direction principale et directions associées) . . . . .	103
3.24	Diagramme de Voronoï obtenu à partir des 90 stations de mesure . . . . .	103
3.25	Visualisation des conditions plus ou moins favorables des différentes étendues selon les quatre tendances détectées, zonage à partir d'un diagramme de Voronoï . . . . .	104
4.1	Les quatre modes de vigilance de la démarche CRISTAL . . . . .	111
4.2	Les étapes de la démarche CRISTAL . . . . .	111
4.3	Exemple d'un itinéraire et ses différents modes de vigilance successifs : Bonneval-sur-Arc, la Met - 18 décembre 2020 . . . . .	112
4.4	Système de fusion d'informations développé et intégration dans la démarche CRISTAL . . . . .	113
4.5	Illustration des niveaux de combinaison successifs sur la base du critère C2 . . . . .	114
4.6	Schéma de principe des niveaux d'agrégation du système d'aide à la détection . . . . .	115
4.7	Étape de la prise de décision : choix possibles (éviter, réduction, changement de projet), cohérents avec l'analyse . . . . .	116
4.8	Localisation de la zone d'étude (Source : Géoportail) . . . . .	118
4.9	Localisation de la zone d'étude, contexte relatif au critère C2 <i>Inclinaison des pentes</i> (Source : Géoportail) . . . . .	119
4.10	Distance aux pentes avalancheuses (Source : Géoportail) . . . . .	119
4.11	Distance d'arrêt des avalanches . . . . .	120
4.12	Données relatives aux observations d'avalanches récentes (triangles bleus) et tests nivologiques (symbole hexagonal de couleur)(Source : <a href="https://projects.listic.univ-smb.fr/cime/synthesis/2022_03_18/haute_maurienne">https://projects.listic.univ-smb.fr/cime/synthesis/2022_03_18/haute_maurienne</a> ) . . . . .	123
4.13	Données relatives à la température de l'air, enregistrées par la station FlowCapt de Bonneval-sur-Arc (Source : <a href="http://www.iav-portal.com/index.php?nav=data_meteo_station_period&amp;lang=fr&amp;code=FBON1&amp;ced=2022-3-18&amp;cpl=6">http://www.iav-portal.com/index.php?nav=data_meteo_station_period&amp;lang=fr&amp;code=FBON1&amp;ced=2022-3-18&amp;cpl=6</a> ) . . . . .	123
4.14	Données relatives aux surcharges nouvelles (précipitations et transport de neige par le vent), enregistrées par la station FlowCapt de Bonneval-sur-Arc (Source : <a href="http://www.iav-portal.com/index.php?nav=data_meteo_station_period&amp;lang=fr&amp;code=FBON1&amp;ced=2022-3-18&amp;cpl=6">http://www.iav-portal.com/index.php?nav=data_meteo_station_period&amp;lang=fr&amp;code=FBON1&amp;ced=2022-3-18&amp;cpl=6</a> ) . . . . .	124
4.15	Résultat du test nivologique réalisé le 18 mars 2022 à proximité du <i>Télesiège des 3000</i> (Source : <a href="http://www.data-avalanche.org/romansns-test/1647600576391">http://www.data-avalanche.org/romansns-test/1647600576391</a> ) . . . . .	125
4.16	Localisation de plusieurs tronçons de l'itinéraire pour le projet envisagé par le groupe de skieurs. . . . .	128
4.17	Exemple de cas permettant de conduire une réflexion sur la taille de la pente et son effet dans le raisonnement de la démarche CRISTAL et en particulier en phase de détection . . . . .	129
4.18	Illustration de la taille de la zone tampon (orange) sur un itinéraire précis . . . . .	141
4.19	Exemple 1 : Pointe des Ratissières le 30 décembre 2020 . . . . .	142
4.20	Exemple 2 : Bonneval sur Arc secteur de La Met le 18 décembre 2020 . . . . .	143

---

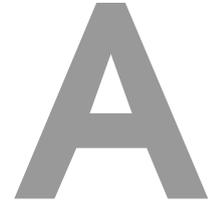
4.21	Portion d'itinéraire associée à un mode de vigilance <i>Alerté</i> du fait de la prise en compte du sous-critère C2.7 dans l'analyse . . . . .	146
4.22	17 situations extraites de trois itinéraires de ski de randonnée . . . . .	147
4.23	Étapes d'un niveau d'agrégation du système de fusion d'informations développé . . . . .	151
4.24	Évaluation automatique de la Situation 13 . . . . .	152
4.25	Carte de présentation du tronçon d'itinéraire évalué en Situation 13 (rouge) . . . . .	153
4.26	Deuxième évaluation de la Situation 13 . . . . .	154
4.27	Intérêt de l'étape d'explication et boucle de rétroaction sur l'évaluation du mode de vigilance . . . . .	155
4.28	Application smartphone du réseau ROMANSns pour guider l'utilisateur dans la réalisation de tests nivologiques . . . . .	158
4.29	Application smartphone du réseau ROMANSns pour guider l'utilisateur dans la réalisation de tests nivologiques . . . . .	158
4.30	Capture d'écran de l'outil SYNTHESIS dans le cadre du massif de la Haute-Maurienne à la date du 06 mars 2023 . . . . .	159
4.31	Application Outline pour la prise de photo et le détournement de l'observation . . . . .	160
4.32	Produits du prototype de recueil d'observations d'avalanches . . . . .	160
5.1	Évolution de la place de CRISTAL dans la synthèse des méthodes existantes . . . . .	168
5.2	Principe de la fuzzification à partir des limites entre classes . . . . .	173
5.3	Principe de la fuzzification à partir de la triangulation de Delaunay . . . . .	173
5.4	Portions des massifs alpins français à l'extérieur de la triangulation (zones rouges) . . . . .	174
A.1	Méthodes triées par flexibilité et aspects subjectifs . . . . .	XXXVII
B.1	Les trois étapes d'un système flou . . . . .	XL
B.2	Triplet de la forme $(V, X, Tv)$ dans le cas du sous-paramètre <i>Pentes fréquentées</i> . . . . .	XLI
B.3	Exemples de valeurs d'entrées pour les sous-critères C2.2, C2.5, C2.6 et C2.7 . . . . .	XLIV



## Liste des tableaux

1.1	Tableau comparatif des valeurs de prévention estimées par les trois études présentées [Mccammon2004b] [Hallandvik2012] [Behr2018] . . . . .	29
2.1	Évaluation des QCNF selon [Descamps2016] . . . . .	64
2.2	Valeurs prises par le sous-critère C6.2 <i>Efficacité</i> . . . . .	69
2.3	Synthèse de la décomposition des critères . . . . .	71
3.1	Mise en application du modèle établi sur 10 nouvelles enveloppes d’avalanches . . . . .	84
3.2	Distances entre les journées à analyser et les classes finales . . . . .	101
3.3	Synthèse des sous-critères, paramètres et sous-paramètres automatiquement évaluables . . . . .	107
4.1	Synthèse du système global . . . . .	137
4.2	Comparaison des modes de vigilance estimés par un expert et par le système à proximité de la Pointe des Ratissières le 30 décembre 2020 . . . . .	140
4.3	Comparaison des modes de vigilance estimés par un expert et par le système à proximité de la Pointe des Ratissières le 30 décembre 2020 . . . . .	145
4.4	Comparaison des modes de vigilance estimés par un expert et par le système pour 17 situations de validation . . . . .	148
4.5	Comparaison des valeurs de C2 estimées par un expert et par le système pour 17 situations de validation . . . . .	150
4.6	Effet de l’estimation invalide de C2 par le système sur le mode de vigilance . . . . .	151
A.1	Critères de la formule 3x3 utilisés dans les différentes méthodes . . . . .	XXVII
A.2	critères utilisés dans les méthodes d’aide à la décision . . . . .	XXVIII
A.3	Phases d’utilisation des méthodes d’aide à la décision existantes . . . . .	XXXI
A.4	Types des méthodes d’aide à la décision existantes . . . . .	XXXIII
B.1	Exemples de t-normes et t-conormes . . . . .	XLII
B.2	Exemples d’implications . . . . .	XLII
D.1	Exemples de combinaisons impossibles . . . . .	LIX





## Étude comparative basée sur quatre critères d'analyse

---

*Cette annexe présente une comparaison des treize méthodes d'aide à la décision existantes. L'analyse comparative est conduite sur la base de quatre critères permettant 1) d'évaluer à quel point les méthodes permettent d'obtenir une vue d'ensemble de la situation, 2) d'estimer leur capacité à être utilisées dans les différentes phases d'une randonnée à ski, 3) de connaître le type de méthode dont il s'agit (statistique ou experte) et enfin 4) d'appréhender leur flexibilité et les aspects subjectifs présents dans les méthodes. Chacun de ces quatre critères d'analyse sont traités dans l'une des sections présentées.*

---

## A.1 Critère 1 : Vue d'ensemble de la situation

Höller écrit que : "le niveau de danger et l'angle de la pente sont les deux principaux paramètres d'entrée de toutes les méthodes stratégiques, mais ces paramètres ne sont ni suffisants pour une évaluation complète, ni faciles à déterminer" [Höller2018] (notons qu'Höller emploie le terme *méthodes stratégiques* pour désigner les méthodes d'aide à la décision dont nous traitons). Il ajoute qu'il est nécessaire "d'avoir une vue d'ensemble de la situation qui prévaut, ce qui ne peut être obtenu que par des informations supplémentaires". D'après Höller, "comme ces informations ne sont pas prises en compte dans les méthodes stratégiques, ces outils ne peuvent être recommandés pour les experts, tels que les guides de montagne" [Höller2018]. Et donc, "il semble que les méthodes stratégiques ne conviennent ni aux débutants ni aux experts".

Pour modérer les propos d'Höller, il est vrai que certaines méthodes (et en particulier les Méthodes de Réduction de Munter : MRP, MRE, ASM et MRG) reposent seulement sur le niveau de danger du BERA et l'angle de la pente, alors que ces deux critères ne permettent pas de fournir aux utilisateurs une vision d'ensemble de la situation. Par contre, dès 1999, le NT permet de ré-évaluer le niveau de danger à travers une liste de questions incluant de nombreux critères. Le NT s'affranchit donc du seul BERA et considère un nombre important de critères (à travers plus de 35 questions). D'autres auteurs, considérant que "la capacité d'un décideur à gérer de trop nombreux paramètres est limitée" [Duclos2012], ont développé des méthodes utilisant davantage de critères que les deux seuls évoqués, mais retenant malgré tout un nombre limité de critères ; c'est le cas des méthodes OCM et CRISTAL.

Dans ce contexte, il semble donc important de déterminer si les méthodes permettent ou non de donner aux utilisateurs une vue globale de la situation. Cette question est traitée en menant une analyse rigoureuse de l'ensemble des méthodes à travers les critères importants que chacune d'entre elles considèrent. Cette section présente une analyse complète des méthodes. D'abord, nous étudions quels critères globaux sont pris en compte dans les méthodes (parmi les 3 critères de la formule 3x3). Ensuite, nous analysons les méthodes à travers six critères principaux relatifs au terrain et aux conditions.

### A.1.1 Analyse à travers les critères de la formule 3x3

Il est d'abord possible d'analyser à quel point les méthodes donnent une vue d'ensemble de la situation à travers le prisme de la formule 3x3, formule qui considère 3 critères à 3 niveaux géographiques différents ("*régional, local et zonal*") [Munter2003]. Ces trois critères sont les suivants : *Conditions, Terrain, et Facteur humain* [Munter2003]. Le Tableau A.1 montre les critères pris en compte dans chacune des méthodes analysées. Les méthodes considèrent toujours les conditions nivo-météorologiques ainsi que le terrain (de façons plus ou moins complexes) mais ignorent souvent les facteurs humains (voir Tableau A.1). NT, les six pièges heuristiques de McCammon (*Heuristic Traps*) et CRISTAL sont les seules méthodes qui considèrent véritablement les facteurs humains. Cependant :

- NT ne considère qu'un nombre limité de facteurs humains comparé à ceux évoqués dans la formule 3x3 ;
- OCM, avec *Heuristic Traps*, liste certains facteurs humains sans donner d'approche pour aider les utilisateurs dans la gestion de ces biais humains sur le terrain ;
- dans CRISTAL, les facteurs humains sont une partie intégrante de l'évaluation du mode de vigilance à adopter, mais ils ne sont pas expliqués et aucune directive n'est donnée.

Par conséquent, même si le rôle des facteurs humains dans les accidents d'avalanche est bien identifié [McCammon2009a], ce critère est majoritairement ignoré dans les méthodes d'aide à la décision existantes. Seulement trois méthodes sur treize le prennent en compte, et ce de manière partielle uniquement. On peut noter qu'en 2013, Cierco et Escande ont proposé la formule 3x3

étendue. Il s'agit d'un schéma de décision qui "*peut être combiné avec toutes les méthodes d'aide à la décision*" et qui vise à insister sur le rôle significatif que jouent les facteurs humains dans le processus de décision. Ils devraient en effet être mieux pris en compte dans la gestion du risque d'avalanche [Cierco2013].

Méthodes d'aide à la décision	Conditions	Terrain	Facteur humain
Méthode de Réduction Professionnelle (MRP)	x	x	
Méthode de Réduction Élémentaire (MRE)	x	x	
Systematic Snow-cover Diagnosis (SSD)	x	x	
Stop or Go (SoG)	x	x	
NivoTest (NT)	x	x	x
SnowCard et Faktorencheck (SC)	x	x	
Méthode des indices évidents (OCM) et Heuristic Traps	x	x	x
Méthode de Réduction Graphique (MRG)	x	x	
Avaluator (Av)	x	x	
After Ski Method (ASM)	x	x	
Démarche CRISTAL (CRISTAL)	x	x	x
Méthode de Réduction Quantitative (MRQ)	x	x	
To Go or Not To Go (TGoNTG)	x	x	

x signifie prise en considération du critère

Tableau A.1 – Critères de la formule 3x3 utilisés dans les différentes méthodes

Comme évoqué, les deux critères relatifs au terrain et aux conditions sont utilisés par l'ensemble des méthodes (voir Tableau A.1). Nous analysons cela plus en détail dans la partie suivante.

### A.1.2 Analyse à travers 6 critères liés au terrain et aux conditions

En France, un consensus est établi à la fois entre les professionnels (guides de montagne représentés par le SNGM<sup>1</sup>) et les pratiquants amateurs (représentés par la FFCAM<sup>2</sup>), sur l'usage de six critères principaux (*Niveau de danger du BERA (ND)*, *Inclinaison des pentes (Incl.)*, *Observations récentes d'avalanches (Obs.)*, *Augmentation de température et fonte (Temp.)*, *Surcharge (Surch.)* et *Couche fragile enfouie (CF)*). Comme nous avons pu le mentionner en Introduction, notons que ces six critères émanent des cinq situations typiques d'avalanches existantes. La température, la surcharge et la présence ou non d'une couche fragile dans le manteau neigeux ainsi que ses caractéristiques sont des critères liés aux conditions qui jouent sur la formation et la désagrégation de la couche fragile. À cela s'ajoute un critère relatif aux pentes, c'est-à-dire aux prédispositions du terrain nécessaires au départ d'avalanches. Les observations récentes d'avalanches sont prises en compte pour compléter l'évaluation puisqu'il s'agit d'un très bon indicateur du niveau de danger en cours, le seul indicateur indéniable de la présence d'une couche fragile active dans le manteau neigeux. À ces cinq critères principaux s'ajoute naturellement la prise en compte du niveau de danger du bulletin d'avalanche qui, s'il n'émane pas directement des cinq situations typiques, demeure un produit public faisant référence depuis longtemps.

Pour affiner notre analyse conduite dans la partie précédente, nous étudions donc ici lesquels de ces six critères sont exploités par les différentes méthodes. Le Tableau A.2 fournit une vue d'ensemble

1. Syndicat National des Guides de Montagne

2. Fédération Française des Clubs Alpains et de Montagne

et un résumé des différents critères utilisés dans chaque méthode étudiée. Il s'agit d'estimer à quel point elles permettent de traduire et de prendre en compte l'ensemble de la situation.

Decision support methods	ND	Incl.	Obs.	Temp.	Surch.	CF
Méthode de Réduction Professionnelle (MRP)	x	x		~		
Méthode de Réduction Élémentaire (MRE)	x	x				
Systematic Snow-cover Diagnosis (SSD)		x				x
Stop or Go (SoG)	x	x	x	~	x	
NivoTest (NT)	x	x	x	~	x	x
SnowCard et Faktorencheck (SC)	x	x		x	x	x
Méthode des indices évidents (OCM) et Heuristic Traps	x	x	x	~	x	
Méthode de Réduction Graphique (MRG)	x	x				
Avaluator (Av)	x	x	x	x	x	x
After Ski Method (ASM)	x	x				
Démarche CRISTAL (CRISTAL)	x	x	x	x	x	x
Méthode de Réduction Quantitative (MRQ)	x	x				
To Go or Not To Go (TGoNTG)		x	x		x	~

x signifie prise en considération complète du critère; ~ signifie prise en considération partielle du critère

Tableau A.2 – critères utilisés dans les méthodes d'aide à la décision

### Niveau de danger du BERA

Les méthodes MRP, MRE, SoG, SC, OCM et MRG prennent le niveau de danger du bulletin dans leurs critères d'entrée. L'indice du bulletin concerne cependant une échelle régionale (celle des massifs) et trouve donc des limites une fois utilisé à un niveau zonal, c'est-à-dire à l'échelle de la pente. De plus, il existe aussi des différences entre les bulletins d'un pays à un autre, ce qui procure aux méthodes des différences de résilience selon le lieu où elles sont implémentées. Le NT, qui ne considère le niveau de danger du BERA que dans sa phase de diagnostic, est moins concerné par ces limitations.

Comme nous avons pu le mentionner (voir Chapitre 1, Section 1.1.5), l'utilisation du niveau de danger du bulletin limite aussi ces méthodes à des étendues et des périodes couvertes par ce dernier. Sinon, cela nécessite une évaluation personnelle du niveau de danger associé à la situation. Pour mémoire, des outils ont été développés pour aider les pratiquants en l'absence de bulletin. Tout de même, ces estimations personnelles auront a minima, à la manière des différences entre les bulletins existants, un impact sur l'efficacité et la résilience de la méthode.

SSD et TGoNTG sont finalement les deux seules méthodes qui ne prennent pas en compte le niveau de danger du bulletin dans leurs critères d'entrée.

### Inclinaison des pentes

Concernant ce critère (lié au terrain), alors que toutes les méthodes prennent en compte le critère *Inclinaison des pentes*, toutes ne le font pas de la même manière. MRP, MRE, ASM, MRG et SoG considèrent l'inclinaison des pentes par gammes de valeurs avec des nuances par tranche de 5°. SC, qui est plus graphique, considère ce critère avec des nuances continues. La méthode SSD fixe comme seule distinction pour la pente un seuil de 30°. Pour rappel, comme cela est présenté

dans Schweizer et al. : "*une pente d'inclinaison supérieure à 30° est généralement requise pour l'avalanche de neige sèche*" [Schweizer2003]. NT, OCM et CRISTAL font de même que SSD.

Les trois méthodes restantes (Av, MQR et TGoNTG) considèrent bien sûr elles aussi la pente. Cependant, elles prennent en compte un critère de terrain plus complexe et plus complet. TGoNTG ne repose en effet pas seulement sur l'angle de la pente, mais prend aussi en compte la courbure de la pente et la densité forestière [Harvey2018a]. Av a un critère lié au terrain basé sur le modèle ATES (présenté en Section 1.1.1 du Chapitre 1). Ce critère émerge donc de l'analyse des onze critères de l'ATES. De la même manière, la MRQ utilise un indicateur de terrain plus complet, inspiré des critères de l'ATES [Schmudlach2018]. Si des différences persistent cependant dans les critères utilisés par l'une ou l'autre des méthodes, leur principe reste le même, en classant les terrains dans différentes catégories selon leur exposition aux avalanches.

### **Observations récentes d'avalanches**

Ce critère est pris en compte dans six méthodes. La méthode OCM et par extension AV (puisqu'elle est héritée d'OCM) complètent même ce critère en prenant en considération les signes d'instabilité (tels que les fissures et les *whumpfs*).

### **Augmentation de température et fonte**

Quand ce critère est pris en compte dans les méthodes, il est souvent partiellement couvert. MRP, SoG, NT et OCM prennent en effet en compte un critère lié au seul concept de fonte, en ne considérant que l'humidification. Cela ne couvre donc pas le cas d'une éventuelle augmentation de température sans fonte, situation qui peut pourtant avoir un impact sur la stabilité du manteau neigeux [Schweizer2003] [Schweizer2010a].

SC, Av2 et CRISTAL ont par contre une totale prise en considération de ce critère, en prenant en compte aussi une possible augmentation de température sans fonte. Dans le cas de l'Av, ceci est rendu possible par un apport important de la seconde version de la méthode [Haegeli2010].

### **Surcharge**

Ce critère fait référence à une surcharge du manteau neigeux du fait de l'apport de neige fraîche, de pluie ou du transport de la neige par le vent. Sept méthodes prennent en compte ce critère dans leurs critères d'entrée : SoG, NT, SC, OCM, Av, CRISTAL et TGoNTG. La plupart du temps, ce sont principalement les notions de neige fraîche et de neige transportée par le vent qui sont prises en compte.

### **Couche fragile enfouie**

Ce sixième et dernier critère est utilisé en particulier dans la méthode SSD. Elle est en effet presque exclusivement basée sur ce critère *Couche fragile enfouie*. La composante clef de cette méthode réside dans le fait de trouver la couche fragile dominante dans le manteau neigeux, puis de tester la combinaison couche fragile / couche supérieure (i.e. plaque). Ceci est analysé sur le terrain à travers la réalisation d'un *Profil de neige simplifié* [Kronthaler2006].

La présence ou l'absence de couche fragile est aussi prise en compte dans les méthodes NT, SC et CRISTAL. En ce qui concerne Av, la seconde version seulement (i.e. Av2) prend en compte ce critère. À nouveau, TGoNTG considère ce critère de façon partielle, cette méthode évoquant seulement la notion imprécise de "*Problème sévère d'avalanche*" pour le critère *Couche fragile enfouie*.

### Autres critères utilisés dans les méthodes d'aide à la décision

D'autres critères sont utilisés dans les méthodes d'aide à la décision, pour plus de détails, le lecteur peut se référer au plus récent survey considérant les facteurs et méthodes utilisés par les experts [Landrø2020b]. Landrø et al. présentent tous les critères qui peuvent être identifiés dans la plupart de ces méthodes. Ils présentent en effet les facteurs qu'ils ont identifiés dans neuf des treize méthodes d'aide à la décision présentées ici (MRP, ASM, SC, SoG, NT, Av2, MRG, OCM, SSD) ainsi que la formule 3x3. D'après eux, ces facteurs sont divisés en 5 catégories :

- *Neige et avalanche*, dans laquelle ils identifient 13 facteurs,
- *Évaluation du manteau neigeux et test de stabilité*, avec 10 facteurs,
- *Prévision d'avalanche*, avec 7 facteurs,
- *Groupe et gestion du groupe*, avec 13 facteurs,
- *Terrain*, avec 10 facteurs.

En laissant de côté les treize facteurs qui correspondent au facteur humain, ces 40 facteurs ne sont autres que des sous-critères des six critères principaux étudiés ici. L'exemple suivant permet d'illustrer cette remarque : concernant le terrain, dans les six critères étudiés ici (tirés des cinq situations typiques d'avalanche faisant consensus en Europe), seul l'angle de la pente est pris en compte. Ce critère est grossier et pour mieux considérer le terrain, il y a bien sûr un sens à le définir plus finement (comme en considérant de façon nuancée différents intervalles de pentes) et en considérant d'autres sous-critères, avec la prise en compte de sa forme, sa taille ou encore de son couvert forestier par exemple. L'analyse de Landrø et al. [Landrø2020b] est donc poussée à un niveau plus fin. Pour des raisons de simplification, l'analyse comparative a été réalisée ici à un niveau plus général, c'est-à-dire sur les six critères principaux issus des situations typiques d'avalanches, plutôt que sur l'ensemble des sous-critères identifiés par Landrø et al. [Landrø2020b].

Pour finir, il est essentiel de noter que ces différents critères sont souvent entachés d'incertitudes, du fait notamment de la variabilité spatiale du manteau neigeux, de la complexité des mécanismes de déclenchement et de la variété de tailles d'avalanches issues de situations qui semblent pourtant similaires [Duclos2012]. Ainsi, inévitablement, les critères et leur évaluation sont aussi incertains et imprécis. Höller illustre cela à propos de la pente en affirmant que "*la mesure précise de l'inclinaison sur le terrain est assez difficile*" et "*la détermination d'un angle de pente est non trivial ; les erreurs de mesure et les fausses estimations sont le cas général et non l'exception*" [Höller2018]. Ce qui est valide pour l'angle de la pente l'est aussi pour l'ensemble des autres critères, tous sujets aux incertitudes. Cependant, cette incertitude n'est que peu ou pas gérée par les méthodes. La seule façon de la gérer, actuellement, est de donner des transitions floues sur des graphiques, comme le fait SC selon McCammon et Haegeli [Mccammon2004b] et l'Av dont les transitions floues représentent la nature probabiliste du risque d'avalanche [Haegeli2006].

## A.2 Critère 2 : Utilisation dans les différentes phases d'une randonnée à ski

L'évaluation des différents critères est toujours sujette à des erreurs, de mauvaises interprétations et un manque de précision, et une grande partie des connaissances sur ces différents critères est encore incertaine. Duclos parle en effet de "*connaissance incomplète des mécanismes de déclenchement des plaques et, surtout, d'incapacité à obtenir toutes les informations nécessaires*" [Duclos2012]. Pour ces raisons, aucune évaluation ne doit être définitivement acquise. Les évaluations doivent toutes être remises en question et les critères constamment réévalués au cours

du temps, avec l'apparition de nouveaux indices et indicateurs sur le terrain. La quantité d'information disponible augmente de la phase de planification (à distance) aux passages clefs (sur le terrain); c'est pourquoi la ré-évaluation des premières conclusions est nécessaire au cours d'une sortie à ski. Cette section analyse dans quelle mesure les méthodes permettent cette remise en question au cours des différentes phases de la sortie. Nous étudions pour cela à quelle(s) phase(s) d'une randonnée à ski (selon les phases de la formule 3x3) les méthodes sont dédiées (voir Tableau A.3). Ainsi, il s'agit d'analyser si les méthodes permettent de remettre en question les observations initiales et premières conclusions. Cela permet donc d'évaluer si les différentes méthodes permettent ou non de satisfaire le principe de la formule 3x3 communément admise.

Comme le suggérait Munter, ré-évaluer les critères au cours des trois filtres successifs (régional, local et zonal) met en œuvre un processus tolérant aux fautes [Munter2003]. Les skieurs peuvent ainsi progressivement corriger leurs erreurs et mauvais jugements et évaluer les critères plus en détails. Munter décrit cela comme des "*boucles itératives*" rendues possibles par ce qu'il appelle "*trois filtres imbriqués*". Les nouvelles informations progressivement obtenues sur le terrain viennent alors vérifier et corriger, si nécessaire, les premières informations, prévisions et hypothèses réalisées à distance [Munter2006].

Méthodes d'aide à la décision	Planification	Arrivée sur le terrain	Passages clés
Méthode de Réduction Professionnelle (MRP)	x	x	x
Méthode de Réduction Élémentaire (MRE)	x	~	~
Systematic Snow-Cover Diagnosis (SSD)		x	x
Stop or Go (SoG)	x	x	x
NivoTest (NT)	~	x	x
SnowCard et Faktorencheck (SC)	x	x	x
Méthode des indices évidents (OCM) et Heuristic Traps	x	x	x
Méthode de Réduction Graphique (MRG)	x	~	~
Avaluator (Av)	x	x	x
After Ski Method (ASM)	x	~	~
Démarche CRISTAL (CRISTAL)	x	x	x
Méthode de Réduction Quantitative (MRQ)	x		
To Go or Not To Go (TGoNTG)			x

x pour les phases d'utilisation auxquelles les méthodes sont dédiées; ~ lorsque les méthodes ne sont que partiellement dédiées à cette phase

Tableau A.3 – Phases d'utilisation des méthodes d'aide à la décision existantes

Les Méthodes de Réduction de Munter (i.e. MRP et MRE) sont nécessairement dédiées à être utilisées durant les trois phases d'une randonnée à ski. Tous les critères qu'elles prennent en compte peuvent être évalués à la maison lors de la phase de préparation de la sortie grâce au BERA et à des cartes. Ensuite, sur le terrain, tous les éléments peuvent être ré-évalués. En connaissant sa position précise, en adaptant son itinéraire et en ayant plus d'informations sur les conditions locales (en particulier dans le cas de la MRP), les utilisateurs peuvent contrôler à nouveau et plusieurs fois qu'ils respectent toujours les règles conseillées par la méthode d'aide à la décision. D'autres méthodes, héritées des Méthodes de Réduction de Munter, en particulier ASM (qui est strictement la même que la MRE excepté dans les valeurs données) et la MRG (qui est la représentation graphique de la MRE), peuvent de manière similaire être appliquées durant les trois phases d'une randonnée à ski. Ceci est vrai en théorie. Cependant, en réalité, bien que dédiées aux trois phases, ces trois méthodes (MRE, ASM et MRG) semblent plutôt être destinées à une phase

de planification, tandis que les phases de terrain correspondent davantage à une vérification. Ces méthodes ont en effet de très petites marges et évolutions possibles entre l'évaluation en phase de préparation et au cours des phases de terrain.

Ensuite, SoG et SC (héritées des Méthodes de Réduction de Munter), à l'inverse, semblent renforcer l'idée d'être dédiées à plusieurs phases, puisqu'elles sont constituées de deux composantes. Les facteurs qu'elles introduisent (concernant les conditions nivo-météorologiques) peuvent être évalués une première fois en phase de planification mais doivent aussi être ré-évalués plus en détails avec des informations directes sur le terrain. Le check 1 de SoG et la première partie de SC semblent plutôt dédiées à une phase de planification (bien qu'elles puissent être ré-évaluées sur le terrain, comme cela est en théorie le cas pour la MRE). Le check 2 de SoG et la *Faktorencheck* semblent particulièrement dédiées à une utilisation dans les deuxième et troisième phases d'une sortie à ski, c'est-à-dire sur le terrain (bien qu'elles puissent être d'abord grossièrement évaluées au cours de la phase de préparation). De la même manière, l'Av, qui a deux composantes (ATP et OC), est particulièrement dédiée à différentes phases. Cela rend alors possible une remise en question des premières évaluations. La partie ATP est particulièrement dédiée à une phase de planification tandis qu'OC est particulièrement dédiée à l'évaluation de la pente et donc à une utilisation sur le terrain.

McCammon et Duclos évoquent chacun pour leur méthode qu'elle est dédiée à toutes les phases d'une sortie à ski [McCammon2006a] [Duclos2012].

En théorie, NT peut être appliqué dans les trois phases, bien qu'il peut être difficile de répondre à toutes les questions à distance du terrain, i.e. au cours de la phase de planification. Il y a alors un réel intérêt à ré-évaluer l'ensemble des questions sur le terrain, pour corriger certaines hypothèses. Fortement basé sur des informations plus faciles à collecter sur le terrain, le NT reste difficile à appliquer en phase de préparation.

Ainsi et pour résumer, NT, MRE, ASM et MRG, bien qu'a priori développées pour une utilisation durant les trois phases, se comportent de la même manière, en étant finalement plutôt dédiées à l'une ou l'autre des différentes phases : MRE, ASM et MRG sont plutôt appropriées à une utilisation en phase de planification tandis qu'à l'inverse, NT est plutôt approprié aux phases de décision sur le terrain.

Les méthodes SSD, MRQ et TGoNTG sont quant-à elles destinées à l'une ou l'autre des trois phases.

La méthode SSD est seulement faite pour un usage sur le terrain puisqu'elle est basée sur des observations précises du manteau neigeux (à travers un test nivologique). Elle n'est donc pas utilisable avant, i.e. au cours de la préparation de la sortie à ski. Dans ce cas, il n'est pas possible de remettre en question les décisions entre la phase de planification et l'arrivée sur le terrain ou lors de la prise de décision au niveau de la pente. De la même manière, TGoNTG (que l'on appelle aussi *Décider dans la pente*) est clairement dédiée à une phase de prise de décision au niveau de la pente, à chaque passage clef [Harvey2018a].

Pour finir et à l'inverse, la MRQ est dédiée à la phase de planification. La MRQ ajoute en effet de la complexité. Elle est basée sur un algorithme et nécessite alors un calcul informatisé du *risque relatif* [Schmudlach2018], c'est pourquoi son utilisation est seulement possible en phase de planification.

Pour résumer, la plupart des méthodes sont faites pour être utilisées durant les trois phases successives d'une randonnée à ski, phases identifiées par Munter dans sa formule 3x3 qui est communément admise. Certaines d'entre elles sont cependant plus adaptées à l'une ou l'autre de ces phases. Ensuite, les trois méthodes restantes sont à l'inverse seulement dédiées à la phase de planification ou à une utilisation sur le terrain.

### A.3 Critère 3 : Type de méthode : statistique ou experte

Cette section analyse sur la base de quelles connaissances la combinaison des critères exploités dans les différentes méthodes a été établie. Il existe en effet deux types de méthodes : les méthodes statistiques et les méthodes expertes. Les méthodes d'aide à la décision peuvent être plus ou moins complexes et plus ou moins transparentes : les méthodes basées sur des statistiques sont sujettes à être obscures pour les utilisateurs [ACA2015], et par conséquent associées à un effet boîte noire. D'un autre côté, "une plus grande transparence se traduit généralement par une plus grande confiance chez l'utilisateur" [ACA2015]. Souvent, les experts ne croient pas en les statistiques exploitées par les méthodes et adoptent davantage un raisonnement expert, basé sur leur intuition, leur expérience ou des méthodes analytiques [Landrø2018]. Les méthodes statistiques d'aide à la décision existantes ont cependant l'intérêt de structurer le processus de décision et de passer en revue de nombreux points à questionner sur le terrain [Landrø2018]. Cette section vise donc à répondre à la question suivante : parmi les 13 méthodes d'aide à la décision existantes, lesquelles sont basées sur une connaissance experte et lesquelles sont issues de statistiques ? Le Tableau A.4 résume la réponse à cette question et l'ensemble de cette section. Bien sûr, certaines méthodes présentent des bases hybrides.

Méthodes d'aide à la décision	Méthode statistique	Méthode experte
Méthode de Réduction Professionnelle (MRP)	x	
Méthode de Réduction Élémentaire (MRE)	x	
Systematic Snow-Cover Diagnosis (SSD)		x
Stop or Go (SoG)	x	x
NivoTest (NT)	x	
SnowCard et Faktorencheck (SC)	x	x
Méthode des indices évidents (OCM) et Heuristic Traps	x	
Méthode de Réduction Graphique (MRG)	x	
Avaluator (Av) v1	x	x
Avaluator (Av) v2		x
After Ski Method (ASM)	x	
Démarche CRISTAL (CRISTAL)		x
Méthode de Réduction Quantitative (MRQ)	x	
To Go or Not To Go (TGoNTG)		x

x indique le type de la méthode

Tableau A.4 – Types des méthodes d'aide à la décision existantes

#### A.3.1 Méthodes statistiques

##### Méthodes de Réduction de Munter et méthodes associées

La MRP est une méthode statistique basée sur un faible nombre d'accidents d'avalanches (< 100), observés uniquement dans les Alpes suisses, et sur l'analyse de 650 coins glissants. Cependant, cette technique (coins glissants) a été remise en cause puis totalement abandonnée par Munter [Schweizer2002]. Il l'a abandonnée en particulier du fait de la forte variabilité des résultats, induite par un grand nombre de variables liées au terrain et aux conditions météorologiques [Campbell2004]. La SSD est elle aussi impactée par la faiblesse d'être basée essentiellement sur un test nivologique malgré la variabilité des résultats et de la stabilité du manteau neigeux. Elle est en effet basée sur la réalisation d'un profil de neige simplifié [Kronthaler2006], qui n'est autre qu'un

test permettant la réduction du temps de mise en oeuvre pour le réaliser comparé à des tests normalisés comme le rutschblock test [Föhn1987], encouragés puis abandonnés par Munter.

La MRP est donc une méthode basée sur des probabilités et comme le dit Munter la MRP est "*un modèle de décision probabiliste*" [Munter2003]. Elle est alors basée sur l'équation suivante [Munter2003] :

$$\text{Residual risk} = \frac{\text{Danger potential}}{\Pi \text{ Reduction factors}}, \text{ with } \Pi \text{ designating "the product"}$$

La formule a été choisie de telle sorte que le risque zéro soit inatteignable. Le choix de Munter était alors de diviser par deux le nombre de victimes d'avalanches lorsqu'il a créé cette méthode. Ainsi, il a défini le risque résiduel acceptable comme suit [Munter2003] :

$$\text{Acceptable residual risk} = \frac{\text{Danger potential}}{\Pi \text{ Reduction factors}} \leq 1.$$

La MRE étant héritée de la MRP est donc basée sur les mêmes statistiques.

De même, SoG et SC sont deux méthodes héritées de la MRE et présentent alors les mêmes bases statistiques, même si des différences d'interprétations par rapport à la MRE ne sont pas décrites. La lecture de [Mccammon2004b] confirme en effet que SC est basée sur l'expérience des développeurs, une analyse statistique limitée d'incidents d'avalanche et est calibrée par rapport à d'autres cadres de décisions comme la MRE. Nous pouvons ajouter que les deux méthodes, SoG et SC, sont partiellement expertes puisque les critères pris en compte (dans check 2 de SoG et Faktorencheck de SC) n'émanent pas de statistiques mais bien de connaissances expertes.

La MRG étant, de même, héritée de la MRE a donc elle aussi les mêmes bases. Mais, de manière similaire à SC, ses différences ne sont ni décrites ni justifiées dans la littérature. Si elle présente, par rapport à la MRE, une gradation du risque à travers une marge de 5° (voir Chapitre 1, Section 1.2.1), les analyses qui y ont conduit ne sont cependant pas présentées.

Ensuite, puisque ASM est une adaptation de la MRE (avec seulement des différences dans les valeurs communiquées donnant une marge de sécurité aux utilisateurs), nous pouvons supposer que les bases statistiques sont les mêmes. De plus, Brattlien [Brattlien2008] a étudié 751 accidents à partir des données de [Mccammon2004b] pour analyser les marges de sécurité fournies par la méthode comparée à la MRE. Ainsi, nous pouvons nous demander quelles marges de sécurité offre véritablement ASM par rapport à la MRE. Ceci est discuté en détail dans la Section 1.2.3 du Chapitre 1, et en particulier dans sa dernière partie.

## NivoTest

NT est une méthode statistique, basée sur plus de 7000 situations nivo météorologiques et ne prend pas seulement en compte des cas d'accidents ou même d'avalanches [Météorisk2018]. Cependant, alors que Bolognesi affirme que "*Le NivoTest n'est pas une boîte noire qui donne de mystérieux résultats, mais un guide pour observer et comprendre la montagne enneigée*" [Bolognesi2000], le calcul des poids associés aux réponses de chaque question et leur ajustement n'est pas formellement décrit. De même, la définition des plages de valeurs qui permettent de traduire le score global issu de l'évaluation des pondérations sous la forme d'une situation résultante (parmi les trois sorties possibles : *la situation semble sûre, la situation est incertaine ou la situation est dangereuse*) n'est pas clairement définie.

## Méthode de Réduction Quantitative

La MRQ est basée sur un jeu de données de 1695 accidents qui ont eu lieu entre 2002 et 2017, provenant du SLF [Schmudlach2018]. Il s'agit donc bien d'une méthode statistique. De plus, cette méthode prend en compte des données de fréquentation du terrain (avec 47 530 km d'itinéraires GPS). Enfin, cette méthode repose sur un grand nombre d'algorithmes, fonctions, hypothèses et

pondérations de type boîte noire, et ceci est susceptible d'induire diverses dérives et imperfections que nous ne sommes pas en mesure d'évaluer.

### Méthodes des indices évidents et Avaluator

OCM est basée sur 715 accidents qui ont eu lieu aux États-Unis entre 1972 et 2003 [McCammon2004a].

Concernant la première partie de l'Av (ATP), nous pouvons comprendre à la lecture de [Haegeli2006] que ATP est une méthode experte (les couleurs représentant un consensus issu des recommandations établies par plus de trente experts). Ensuite, la partie OC de l'Av est strictement basée sur les mêmes fondements qu'OCM. OC est donc une méthode statistique. En 2010, la seconde version de l'Av est développée avec la partie OC de Av1 qui évolue pour devenir *Slope evaluation* [Haegeli2010]. Haegeli a en effet cherché à capturer l'expertise de la communauté pour la rendre accessible à tous [Haegeli2010]. En l'absence d'autres informations disponibles concernant Av2, il est seulement possible de conclure que la méthode devient uniquement une méthode experte, puisque seule la partie OC de Av1 était basée sur des statistiques. Av1 était donc à la fois statistique et experte, mais la seconde version de cette méthode fait d'elle une méthode entièrement basée sur la connaissance experte.

### Résumé sur les méthodes statistiques

Concernant les méthodes basées sur des statistiques, on peut donc se demander si ces statistiques sont toujours valides aujourd'hui, en particulier dans un contexte de changement climatique, puisque les données ne sont pas mises à jour. Aussi on peut se demander si ces statistiques peuvent servir de base à d'autres massifs montagneux que ceux correspondant aux données utilisées et d'autres habitudes de pratique que celles des données prises en compte. Ainsi, les méthodes statistiques sont-elles transférables, à la fois dans le temps et dans l'espace ? La MRP, par exemple, est en effet basée sur des accidents qui ont eu lieu dans les Alpes suisses uniquement. Selon la couverture géographique des cas pris en compte pour établir les statistiques, on peut se demander si les situations sont extrapolables à d'autres chaînes de montagne, associées par conséquent à d'autres habitudes de pratiques et soumises à d'autres conditions climatiques.

Une autre question concernant l'utilisation des statistiques est que, comme l'indique Gauthier, des valeurs de prévention significatives ne peuvent être calculées qu'à partir d'un jeu de données complet [Gauthier2010]. Le terme *valeurs de prévention* signifie nombre d'accidents passés qui auraient pu être évités en utilisant la méthode. Si les valeurs de prévention donnent un bon ordre d'idée des capacités des méthodes, elles ne permettent pas à elles seules d'évaluer strictement leur efficacité pour la prévention des accidents ni leur utilité générale [Uttl2010]. Ces remarques soulignent donc la difficulté d'établir des méthodes basées sur des statistiques fiables, du fait de jeux de données incomplets et des différences induites par les différentes mesures de gestion des données manquantes qui peuvent être utilisées. Les fondations d'OCM illustrent par exemple cet enjeu. Sur les 715 accidents pris en compte, seulement 252 disposaient d'informations sur les 7 indices évidents exploités dans la méthode [McCammon2006a]. Dans l'ensemble des autres cas, un ou plusieurs indices ne pouvaient être évalués. Cette difficulté était aussi présente lors du développement de l'Av.

De plus, pouvons-nous avoir confiance dans les statistiques sur lesquelles les méthodes d'aide à la décision sont construites ? Selon les experts, cela ne va pas de soi : 14 répondants de l'étude de Landrø et Pfuhl (sur 100) disent ne pas utiliser les méthodes existantes parce que "*ils ne croient pas aux statistiques utilisées dans le développement*" [Landrø2018]. Il semble alors que, pour gagner la confiance des utilisateurs, une méthode d'aide à la décision ne devrait pas reposer uniquement sur des statistiques et devrait être aussi transparente que possible.

Une dernière remarque, soulevée par [Höller2018], concerne le fait que les méthodes statistiques sont principalement basées sur des données d'accidents, mais considèrent rarement les cas

de non-accident et encore moins les cas de non-avalanche. NT, qui prend en compte un grand nombre de situations (et pas seulement des cas d'avalanche), semblent être une exception. De la même manière, la MRQ tente d'atténuer ce problème en prenant en compte l'utilisation du terrain pour nuancer les informations provenant des données d'accidents. De façon similaire, précédemment, Pfeifer évoque à propos des Méthodes de Réduction de Munter que "*il ne prend pas en compte les incidents sans accident d'avalanche*" [Pfeifer2008]. En réaction à cela, il a alors mené une étude dans laquelle il valide les Méthodes de Réduction de Munter sur la base d'informations de fréquence des skieurs [Pfeifer2008].

Notons que Pfeifer a mené son étude sur des données tyroliennes, ce qui permet d'illustrer la transférabilité de la méthode à d'autres massifs alpins. Cependant, Suisse et Autriche sont relativement proches et soumises aux mêmes types de conditions, on peut alors se demander si tel serait le cas pour un transfert à d'autres climats et d'autres latitudes. Il s'agit d'une question que soulèvent Hallandvik et al. qui étudient les Méthodes de Réduction de Munter à travers des données norvégiennes [Hallandvik2012] (voir Chapitre 1, Section 1.2.3).

De plus, McCammon (qui a développé OCM) déclare justement que sa méthode est un *outil de prévention* et non un *outil de prédiction*. Il dit en effet que "*Un jour, lorsque nous disposerons de données fiables sur les conditions dans lesquelles les gens ne déclenchent pas d'avalanche, nous serons en mesure de développer des outils de prédiction. Mais d'ici là, les accidents passés ne peuvent que nous indiquer comment prévenir des accidents similaires à l'avenir.*" [McCammon2006a]

### A.3.2 Méthodes expertes

Comme présenté dans la section précédente, certaines méthodes sont à la fois statistiques et expertes. C'était en particulier le cas de Av1 (qui, puisqu'elle a évolué, est devenue seulement experte) mais aussi des méthodes SC et SoG.

SSD est une méthode qui repose sur une connaissance experte. Dans le cas de SSD, cette connaissance provient du Service Bavarois d'Alerte d'Avalanche qui souhaitait la transcrire dans une méthode afin d'avoir une approche systématique de diagnostic du manteau neigeux. De manière similaire, CRISTAL n'est pas basée sur des statistiques mais sur l'expérience des développeurs, issue de plusieurs décennies de mesures et d'observations "*soit sur des manteaux neigeux qui n'ont pas produit d'avalanche, soit sur des sites d'accidents*" [Duclos2012]. Pour finir, Harvey et al. ne présentent pas les bases de la méthode TGoNTG [Harvey2018a]. En l'absence de statistiques mentionnées, il est seulement possible de conclure que la méthode semble être une méthode experte. Cependant, il n'y a aucune explication ni justification du formalisme graphique utilisé (en particulier au regard de la forme de la limite entre les deux zones *y aller* et *ne pas y aller* ainsi que la dimension données aux graduations).

## A.4 Critère 4 : Flexibilité et aspects subjectifs des méthodes

Certaines méthodes donnent aux utilisateurs la possibilité d'adapter les seuils et affiner les valeurs de différents critères. Elles leur permettent donc de s'investir, en prenant véritablement part à la méthode et en l'adaptant à leurs propres attentes. Par dessus tout, on peut lire dans Landrø et Pfuhl que certains experts n'utilisent pas les méthodes d'aide à la décision car "*trop souvent les méthodes disent "Non", les gens skient quand même, mais rien ne se passe*" [Landrø2018]. Ainsi, les méthodes semblent parfois trop contraignantes et restrictives. En étant capables d'agir sur certains seuils et critères, les utilisateurs pourraient d'une certaine manière adapter la méthode à leurs attentes et à leurs niveaux d'exigence en fonction du type de pratique qu'ils recherchent. Les

marges de manœuvre disponibles pour les utilisateurs, lorsqu'ils mettent en œuvre les différentes méthodes, sont présentées dans cette section. Il s'agit donc de présenter la part de flexibilité que les méthodes laissent aux utilisateurs. Il est aussi question d'analyser si la méthode n'est pas totalement subjective, laissant les utilisateurs à leurs propres jugements, ce qui est au final proche d'une absence de cadre ou de recommandation.

#### A.4.1 Méthodes sans marge de manœuvre, entièrement contraintes et objectives

Certaines méthodes ne laissent aucune marge de manœuvre aux utilisateurs et sont entièrement contraintes. C'est le cas de la MRE, de l'ASM et de NT (voir la première branche de la Figure A.1).

En effet et comme l'indique Munter, la MRE n'est pas ajustable au même titre que l'est la MRP [Munter2006]. Les règles sont alors toutes fixes et les évaluations sont réalisées sans jugement personnel de la part des utilisateurs ; il n'y a pas de marge de manœuvre dans la méthode. Une fois encore, dans son principe, ASM est une méthode similaire à la MRE (ces deux méthodes donnent seulement des valeurs différentes) et par conséquent, elle ne dispose pas non plus de marge de manœuvre possible pour les utilisateurs.

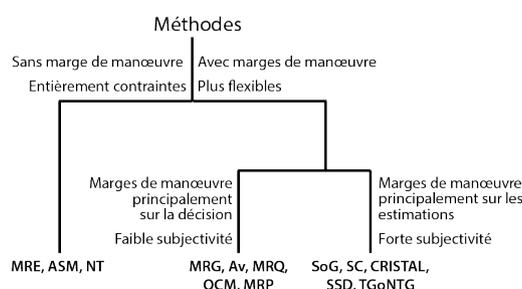


Figure A.1 – Méthodes triées par flexibilité et aspects subjectifs

En ce qui concerne le NT, nous pourrions penser a priori que les différents poids qu'il est possible d'attribuer à chaque critère sont une garantie de liberté pour l'utilisateur, mais en réalité, ils sont tous guidés et associés à des valeurs précises et prédéfinies. Il est en fait question d'ajouter de la finesse et des nuances à la méthode pour les différents critères (puisque différents poids leurs sont donnés en fonction des observations), mais pas de liberté pour les utilisateurs.

Si l'utilisateur est expérimenté, il peut éventuellement décider de réduire le score global communiqué par la méthode en accédant à la seconde liste de questions (portant sur les facteurs de réduction). Cette marge de liberté est donc limitée et n'est pas accessible à tous les utilisateurs.

Pour continuer de façon graduelle, d'autres méthodes disposent quant à elles de petites marges de manœuvre. Elles sont présentés dans la section suivante.

#### A.4.2 Méthodes présentant des marges de manœuvre et aspects subjectifs

Une première série de méthodes disposent de marges de manœuvre principalement sur la décision et sont donc associées à une faible subjectivité. Dans ces méthodes, les règles sont fixes et les utilisateurs ont pour ainsi dire seulement des marges sur la décision. Avec des nuances pour chacune des méthodes, cela concerne la MRG, Av, MRQ, OCM et MRP (voir la deuxième branche de la Figure A.1). Puisque la décision et les seuils sont laissés au choix de l'utilisateur, une part de subjectivité est nécessairement introduite dans ces méthodes. Cependant, dans cette partie, les méthodes sont suffisamment cadrées et fixes pour que la subjectivité introduite ne domine pas.

Les méthodes restantes, quant-à elles, ont des aspects subjectifs beaucoup plus importants induits par les degrés de libertés laissés aux utilisateurs ou du fait des évaluations que la méthode elle-même impose. Ces dernières méthodes ont alors des marges de manœuvre majoritairement sur

les estimations, et sont associées à une forte subjectivité. Ces méthodes (SoG, SC, CRISTAL, SSD et TGoNTG, voir la troisième branche de la Figure A.1) offrent alors aux utilisateurs un certain degré de liberté, mais contiennent dans le même temps de nombreux aspects subjectifs.

# B

## Théorie des sous-ensembles flous

---

*Cette annexe présente d'abord des connaissances générales sur la théorie des sous-ensembles flous : principe, définition, fuzzification. Elle se limite aux notions utilisées dans ce mémoire. Elle illustre ensuite brièvement ses cas d'application dans le contexte de la gestion des risques naturels, contexte dans lequel s'intègre en particulier la gestion du risque d'avalanche.*

---

## B.1 Logique floue : généralités

La théorie des sous-ensembles flous correspond à une extension de la théorie des ensembles ordinaires et a été introduite en 1965 par Zadeh [Zadeh1965]. Elle permet d'utiliser des variables qui ne sont ni nettes ni tranchées, mais qui sont, au contraire, imprécises ou qui comportent des limites mal définies. Il ne s'agit donc plus simplement de dire, pour une variable, si elle est *vraie* ou *fausse* (i.e., la voir de façon binaire : 1 ou 0), puisqu'elle peut alors avoir une appartenance graduelle à plusieurs sous-ensembles. Une variable appartiendra alors en partie à chacun des deux sous-ensembles. La théorie des sous-ensembles flous apporte ainsi la notion d'appartenance graduelle. Les sous-ensemble flous sont définis avec des fonctions d'appartenance, bornées dans l'intervalle  $[0; 1]$ . Ces fonctions traduisent le degré d'appartenance de l'élément au sous-ensemble flou. [Zadeh1965]

La logique floue permet de traduire trois sémantiques principales [Dubois1997] : la gradualité d'un concept (à travers la signification linguistique du mot), l'incertitude de mesure (et donc la possibilité) [Zadeh1978] [Dubois1980] et enfin la préférence (avec la notion de contrainte flexible).

Les trois sections suivantes présentent les trois étapes d'un système flou : la fuzzification, l'inférence floue et la défuzzification (Figure B.1).

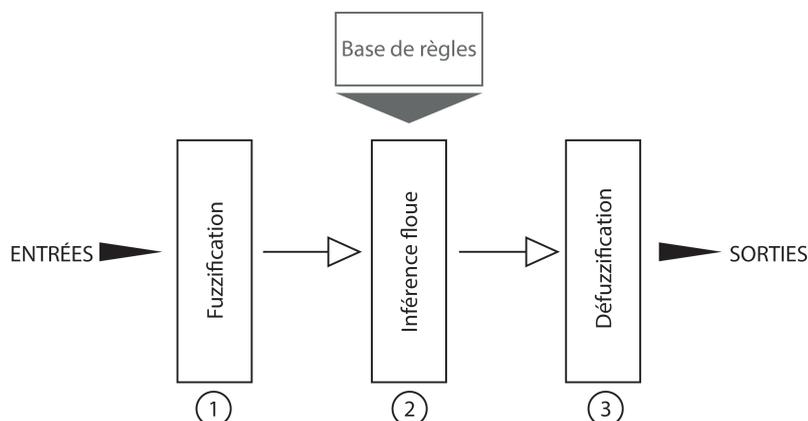


Figure B.1 – Les trois étapes d'un système flou

### B.1.1 Fuzzification

La logique floue est basée sur des variables floues, appelées variables linguistiques (i.e., issues du langage naturel), à valeurs linguistiques dans l'univers du discours, c'est-à-dire exprimées par des qualifications du langage (comme *petit*, *grand* ou *raide* par exemple). Chaque valeur linguistique est un sous-ensemble flou.

Chaque variable est alors définie par un triplet de la forme :  $(V, X, Tv)$  [Bouchon-Meunier1995], où :

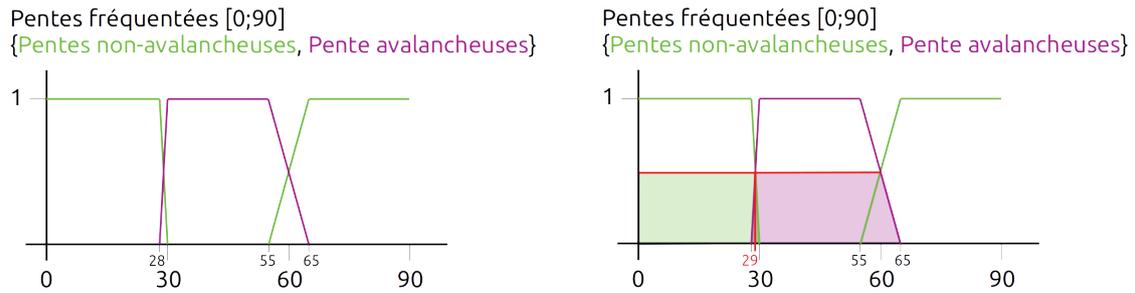
- $V$  est la variable,
- $X$  est l'ensemble de référence,
- $Tv$  est l'ensemble des sous-ensembles flous de  $X$  (utilisés pour caractériser  $X$ ).

L'exemple illustré dans la figure ci-dessous (Figure B.2), tiré du sous-paramètre *Pentes fréquentées* (présenté en Section 2.2.2 du Chapitre 2), permet d'explicitier les composantes de ce triplet à travers un cas concret :

- la variable,  $V$ , est l'inclinaison de la pente (notée *Pentes fréquentées*);
- l'ensemble de référence,  $X$ , est l'ensemble des réels compris entre 0 et 90 inclus (noté  $[0; 90]$ ); ceci correspond aux valeurs d'inclinaison, en degrés, que peut prendre une pente;

- les sous-ensembles flous de  $X$  sont alors "pentes non-avalancheuses" et "pentes avalancheuses".

Dans cet exemple, l'inclinaison de la pente est considérée comme une variable floue, notamment du fait de son imprécision de mesure sur le terrain. Dans ce cas, une pente mesurée à  $29^\circ$  appartiendra bien au sous-ensemble "pentes non-avalancheuses", mais elle appartiendra aussi en partie au sous-ensemble "pentes avalancheuses" (Figure B.2b). En effet, si l'imprécision de mesure est de  $2^\circ$ , alors l'inclinaison réelle de cette pente mesurée à  $29^\circ$  peut potentiellement être de  $31^\circ$ , ce qui est plus raide que  $30^\circ$  et peut correspondre à une "pente avalancheuse".



(a) Triplet associé au sous-paramètre C2.2 Pentes fréquentées

(b) Exemple d'une pente mesurée à  $29^\circ$

Figure B.2 – Triplet de la forme  $(V, X, Tv)$  dans le cas du sous-paramètre Pentes fréquentées

Cette étape, qui consiste à définir une variable de façon floue et à lui associer différents degrés d'appartenance à différents sous-ensembles, s'appelle la *fuzzification*.

Ainsi, tout modèle flou est représenté par sa base de connaissances. Cette dernière se décompose en deux parties : la base de données (décrite ci-dessous) et la base de règles (voir B.1.2).

La base de données permet la caractérisation des variables linguistiques d'entrée et de sortie. Elle comprend, dans le cas d'un modèle expert :

- Pour chaque variable, le triplet de la forme  $(V, X, Tv)$  évoqué ci-dessus, i.e., son nom, sa granularité et les valeurs associées, définis par l'expert.
- Puisque dans notre contexte les variables linguistiques d'entrée ont un univers du discours numérique associé, la base de données comprend, pour chaque variable, des fonctions d'appartenance (fuzzification).
- La variable de sortie, dans le cas d'un modèle symbolique, a la particularité de ne pas être décrite par des sous-ensembles flous numériques mais par des descriptions symboliques floues. Néanmoins, dans le cas où l'on souhaite associer un univers numérique à la sortie du modèle, l'étape de défuzzification (voir B.1.3), qui porte sur le passage d'un univers symbolique vers un univers numérique, peut être effectuée en associant des valeurs numériques, appelées valeurs modales à chacun des symboles de sortie.

## B.1.2 Inférence floue

Dans de nombreuses applications des règles floues sont utilisées. Il existe trois grands types de règles : Mamdani, Takagi Sugeno, symboliques floues. Un ensemble de règles est alors défini. Son rôle est de combiner les données entre elles afin d'en tirer des conclusions.

La base de règles (qui est la deuxième composante de la base de connaissances) est alors définie. Elle présente, dans le cas d'un système symbolique, une structure linguistique. Elle fournit des relations linguistiques sur la base de plusieurs critères afin de refléter la connaissance experte. Si la base de règle d'un modèle flou peut, dans certains cas, être apprise automatiquement à partir de données numériques, elle est, dans notre contexte, définie par l'interrogation d'un expert. Notre

base de règles floues, telle que définie après discussions avec l'expert, sera présentée aux Chapitre 4 et Annexe D.

Les règles sont de la forme :

Si la prémisse  $X$  est  $A_i$  et la prémisse  $Y$  est  $B_j$  alors la conclusion  $Z$  est  $C_k$ ,

où  $A_i$ ,  $B_j$  et  $C_k$  sont des valeurs linguistiques des ensembles  $L_X$ ,  $L_Y$  et  $L_Z$ .

Pour application de la règle compositionnelle d'inférence de Zadeh, nous avons pour une entrée  $(x_0, y_0)$  :

$$\mu(C_k) = \perp_{A_i \in L_X, B_j \in L_Y} T_1(T_2(\mu_{A_i}(x_0), \mu_{B_j}(y_0)), \alpha_{ijk}),$$

avec  $T_1$ ,  $T_2$  des t-normes et  $\perp$  une t-conorme,

et

$$\alpha_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{s'il existe une règle liant } A_i, B_j \text{ et } C_k, \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases}$$

où  $\alpha$  représente le degré de validité de la règle (dans notre cas 100% ou 0%).

Nous obtenons ainsi la description symbolique floue de la conclusion à partir des descriptions symboliques floues des prémisses.

Plusieurs opérateurs peuvent être utilisés pour l'union (i.e., OU) et l'intersection (i.e., ET). Ces opérateurs sont respectivement appelés *t-normes* pour l'intersection et *t-conormes* pour l'union. Le tableau B.1 présente différents exemples de t-norme et t-conorme.

Il en est de même pour l'implication pour laquelle plusieurs formules sont établies. Des exemples de formules sont présentées dans le Tableau B.2. Il est alors nécessaire de choisir les opérateurs d'inférence du système parmi les formules existantes afin de sélectionner celle qui sera la plus adaptée au système de raisonnement.

	<b>t-norme</b>	<b>t-conorme</b>
<b>Zadeh</b>	$\min(x, y)$	$\max(x, y)$
<b>Probabiliste</b>	$xy$	$x + y - xy$
<b>Lukasiewicz</b>	$\max(0, x + y - 1)$	$\min(1, x + y)$

Tableau B.1 – Exemples de t-normes et t-conormes

<b>implication</b>	
<b>Mamdani</b>	$\min_y(\mu_{premisses}, \mu_{conclusion}(y))$
<b>Larsen</b>	$\mu_{premisses} \mu_{conclusion}(y)$

Tableau B.2 – Exemples d'implications

Pour notre application, afin de combiner les prémisses des règles, nous utiliserons l'opérateur PROD (produit) pour l'intersection ET (Équation B.1) et l'opérateur BSUM (somme bornée) pour l'union OU (Équation B.2) impliquée dans l'inférence d'une règle ou dans la combinaison de plusieurs règles. Ces opérateurs sont définis comme suit :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \times \mu_B(x) \quad (\text{B.1})$$

$$\mu_{A \cup B}(x) = \min(1, \mu_A(x) + \mu_B(x)) \quad (\text{B.2})$$

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{B.3})$$

Si, en général, les opérateurs choisis sont duaux afin de respecter certaines propriétés logiques [Klement2004], notamment les lois de Morgan, cette approche est intéressante dans le cas où une vision "logique" des règles est appropriée. Dans notre contexte les règles traduisent une approche interpolative entre les valeurs modales des mots utilisés fournies par l'expert. En conséquence les opérateurs flous que nous avons choisis d'exploiter (produit et somme bornée) permettent d'obtenir en sortie une somme de degrés d'appartenance égale à 1 lorsque les données d'entrées satisfont ces conditions et que le jeu de règle est injectif [Mauris1996]. Cela garantit la cohérence des descriptions linguistiques entre elles et avec l'interprétation humaine. Le fait d'imposer que la somme des degrés d'appartenance à chaque symbole de sortie soit 1 rend en effet plus aisée l'interprétabilité des résultats en terme d'interpolation.

Pour illustrer notre propos, considérons le jeu de règle 2.6-7 :

**IF** (C2.6<sub>1</sub>\_Distance **IS** 1m **OR**  
 C2.6<sub>1</sub>\_Distance **IS** 5m **OR**  
 C2.6<sub>1</sub>\_Distance **IS** 10m) **AND**  
 C2.6<sub>2</sub>\_Inclinaison **IS** 28°

**THEN** C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Oui\_Position\_Dangereuse

Si nous avons une distance de 3m et une inclinaison de 28°, cela correspond à :

$$0,5 / 1m + 0,5 / 5m + 0 / 10m \text{ et } 1 / 28^\circ.$$

Avec les opérateurs produit et somme bornée on obtient : 1 / *Position dangereuse*, ce qui est conforme à la connaissance de l'expert, tandis qu'avec les opérateurs produit et son dual la somme probabiliste ( $x + y - xy$ ) on obtient 0,75 / *Position dangereuse*, ce qui ne correspond pas à l'approche interpolative recherchée.

Un exemple de deux règles est donné ci-dessous pour illustrer le calcul conduisant à l'obtention de la conclusion à partir des prémisses :

Règle 1 :

**SI** C2.2 Pentes fréquentées **EST** Pentes avalanches **ET**  
 C2.7 Surface mobilisable **EST** Grande  
**ALORS** Inclinaison des pentes **EST** Situation dangereuse

Règle 2 :

**SI** C2.2 Pentes fréquentées **EST** Pentes non-avalanches **ET**  
 C2.5 Pentes en aval **EST** Pentes avalanches **ET**  
 C2.6 Peut emporter le skieur **EST** Oui position dangereuse **ET**  
 C2.7 Surface mobilisable **EST** Grande  
**ALORS** Inclinaison des pentes **EST** Situation dangereuse

Avec les données d'entrées visibles sur la Figure B.3, nous avons :

- pour C2.2 *Pentes fréquentées* (voir Figure B.3a) : un degré d'appartenance de 0,25 au sous-ensemble flou *Pentes avalanches* et de 0,75 au sous-ensemble flou *Pentes non-avalanches* (notés : 0,25 / *Avalanches* et 0,75 / *Non-avalanches*);
- pour C2.5 *Pentes en aval* (voir Figure B.3b) : un degré d'appartenance de 1 au sous-ensemble flou *Pentes avalanches* (noté : 1 / *Avalanches*);
- pour C2.6 *Peut emporter le skieur* (voir Figure B.3c) : un degré d'appartenance de 0,2 au sous-ensemble flou *Oui, position dangereuse* et de 0,8 au sous-ensemble flou *Position intermédiaire* (notés : 0,2 / *Dangereuse* et 0,8 / *Intermédiaire*);

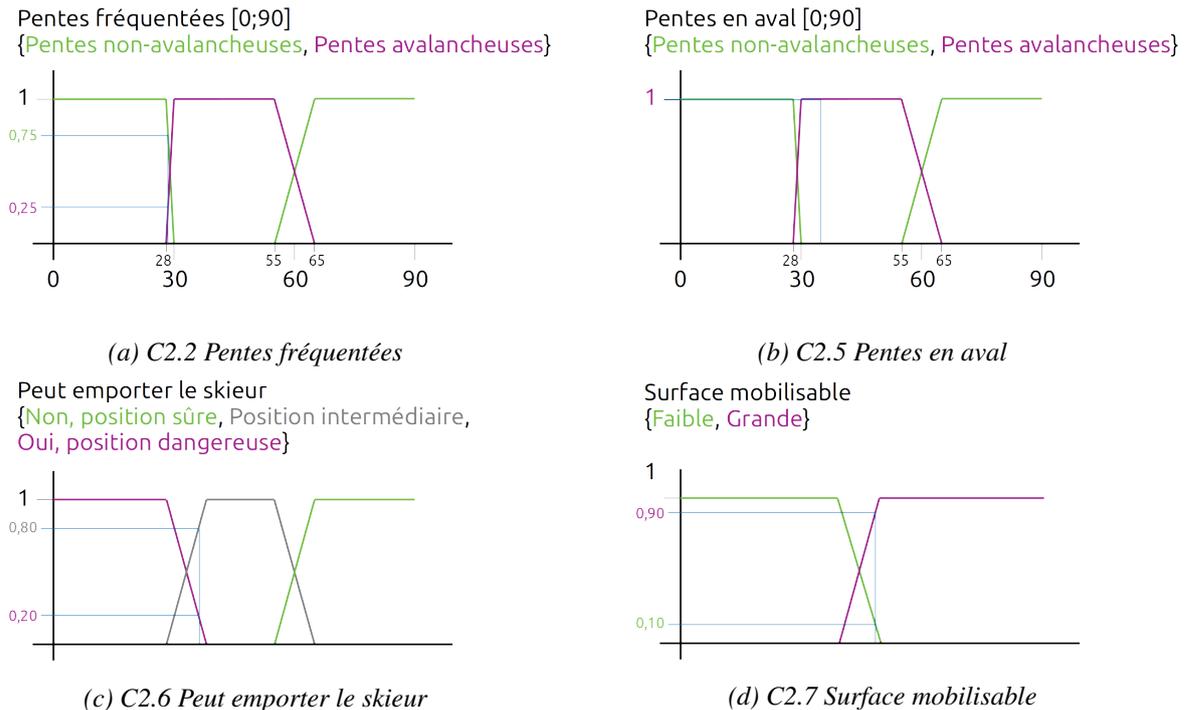


Figure B.3 – Exemples de valeurs d’entrées pour les sous-critères C2.2, C2.5, C2.6 et C2.7

- pour C2.7 *Surface mobilisable* (voir Figure B.3d) : un degré d’appartenance de 0,9 au sous-ensemble flou *Grande* et de 0,1 au sous-ensemble flou *Faible* (notés : 0,9 / *Grande* et 0,1 / *Faible*).

Avec  $T_1$  et  $T_2$  des produits et  $\perp$  la somme bornée, pour les deux règles prises en exemple, nous avons :

- du fait de la règle 1 :

$$T_2(0,25 / \textit{Avalancheuses} ; 0,9 / \textit{Grande}) = 0,225$$

$$\alpha_{ijk} = 1$$

$$T_1(0,225 ; 1) = 0,225$$

- du fait de la règle 2 :

$$T_2(0,75 / \textit{Non-avalancheuses} ; 1 / \textit{Avalancheuses} ; 0,2 / \textit{Oui Dangereuse} ; 0,9 / \textit{Grande}) = 0,135$$

$$\alpha_{ijk} = 1$$

$$T_1(0,135 ; 1) = 0,135$$

Donc :  $\mu(\textit{situation dangereuse}) = \perp(0,225 ; 0,135) = \min(0,225 + 0,135 ; 1) = \min(0,36 ; 1) = 0,36$ .

Ainsi :  $\mu(\textit{situation dangereuse}) = 0,36$ .

Notons que cet exemple n’est qu’une illustration du mécanisme d’inférence sur laquelle il n’est pas mis en évidence que la somme des  $\mu$  en sortie vaut 1 ; un exemple complet sera pour cela présenté au Chapitre 4.

### B.1.3 Défuzzification

L’étape de *défuzzification* permet d’obtenir un résultat numérique. Plusieurs méthodes sont possibles ; nous pouvons citer par exemple la méthode des centres de gravité, ou encore la moyenne des maxima. Comme pour l’implication, il n’y a pas de généralisation possible et le choix de l’emploi d’une méthode plutôt qu’une autre doit être réfléchi en fonction de l’application.

Notons que pour notre application, nous ne mettrons pas en œuvre de défuzzification puisque nous souhaitons conserver les degrés d'appartenance obtenus sur chacune des valeurs de sorties possibles (voir Chapitre 4).

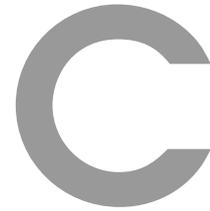
Ainsi, la théorie des sous-ensembles flous permet, grâce à son cadre formel approprié, de pallier l'absence d'information précise et permet donc la prise en compte d'informations graduelles [Bouchon-Meunier1995]. La logique floue apporte donc plus de souplesse que la logique classique et permet à la fois de prendre en compte les imprécisions pour donner plus de flexibilité au raisonnement et de traduire la gradualité des phénomènes. Ainsi, dans le cas d'une connaissance approximative, l'utilisation d'une approche basée sur la théorie des sous-ensembles flous est pertinente pour exprimer les informations et la connaissance [Rossi2009] [Bouchon-Meunier2013].

## B.2 Gestion des risques naturels et avalanches

La logique floue est d'ores et déjà utilisée dans le cadre de la gestion des risques naturels en montagne [Tacnet2010], elle est aussi utilisée pour l'identification de zones de glissement de terrain [Schernthanner2007] ou d'avalanches [Ghinoi2005] [Veitinger2016a], ainsi que pour la modélisation d'avalanches [Zischg2005]. Plus récemment, elle a aussi été utilisée pour les systèmes d'aide à la décision afin d'agréger des critères hétérogènes en vue du choix d'itinéraire à ski [Pourraz2017] ou encore pour fusionner différentes stratégies de décisions dans le cadre de la pratique du ski de randonnée [Pfeifer2018]. Pour rappel, Munter évoquait le fait de "*construire une science à partir d'un savoir incertain*" et parlait de "*prendre des décisions de type OUI/NON sur la base d'informations lacunaires, incertaines et contradictoires*"; il renseigne pour cela la piste de suivre une pensée plus souple, de type "fuzzy logic", en soulignant que "*cette forme de pensée que nous utilisons dans notre vie quotidienne conduit à de meilleurs résultats qu'une pensée rigide et strictement bivalente*" [Munter2006]. Duclos indique qu'il est impossible d'avoir une vue précise de la situation et souligne alors que "*l'acceptation de l'incertitude semble être une condition préalable pour gérer le risque d'avalanche*" [Duclos2012].

Il faut noter que dans l'application de la théorie des sous-ensembles flous au risque d'avalanche, le plus souvent, les fonctions d'appartenances correspondent à la traduction de connaissances expertes (ce qui est le cas de l'exemple présenté dans la section ci-avant). Il faut en effet noter que, puisque l'objectif est de modéliser la connaissance d'un expert du domaine, le vocabulaire employé est défini par l'expert. Les entrées sont exprimées par des données linguistiques sous forme symbolique (i.e., sous la forme d'un symbole, soit une convention qui n'a de sens que dans le contexte dans lequel il est défini [Ioannou2003]). En utilisant la base de règles établie et les opérateurs flous choisis, un modèle symbolique flou est donc développé. Il permet de relier les différentes variables d'entrée à une évaluation en sortie, dans notre contexte, du mode de vigilance à adopter sur le terrain. La sortie du système est donc, elle aussi, donnée par des termes linguistiques : mode de vigilance *Détendu*, *Méfiant*, *Alerté* ou encore *Hasardeux* (voir Chapitre 4). Ainsi, la base de règles fournit des relations linguistiques qui décomposent la notion de mode de vigilance à adopter face au risque d'avalanche (voir Chapitre 4) sur la base de plusieurs critères nivo-météorologiques (voir Chapitre 2) reflétant ainsi la connaissance de l'expert.





## Gestion des données manquantes

---

*Cette annexe traite de la gestion des données manquantes dans le cadre de nos travaux. Elle présente différentes méthodes d'estimation des données manquantes pouvant être envisagées et en évalue l'impact sur les résultats. Les tests réalisés sur un jeu de données réel, sur lequel a été conduit cette évaluation, sont présentés dans cette annexe. Enfin, elle conclue quant à la méthode la plus adaptée pour la gestion des données manquantes dans notre contexte.*

---

## C.1 Méthodes de gestion des données manquantes étudiées

L'analyse de données réelles est souvent confrontée à la gestion de jeux de données incomplets, c'est-à-dire impactés par des données manquantes. Puisque certains traitements statistiques ne peuvent être conduits sur de tels jeux de données, il est essentiel d'exploiter une méthode de gestion des données manquantes, permettant d'imputer des valeurs aux données manquantes et compléter le jeu données [Ngueilbaye2021]. Nous avons été confrontés à cette tâche dans nos travaux et c'est pourquoi nous présentons dans cette section les différentes méthodes que nous avons envisagées pour traiter les données manquantes.

Nous avons étudié six méthodes différentes, définies comme suit :

- **A** : la valeur manquante est remplacée par la valeur moyenne de la variable (calculée sur l'ensemble des individus du jeu de données), i.e., la moyenne de la colonne ;
- **B** : la valeur manquante est remplacée par la valeur moyenne de l'individu considéré (calculée sur l'ensemble des variables du jeu de données), i.e., la moyenne de la ligne.
- **C** : la valeur manquante est remplacée par 0.
- **D** : la valeur manquante est remplacée par la valeur moyenne de précipitations, tous individus et toutes variables confondues, i.e., moyenne de toutes les cellules.
- **E** : la valeur manquante est remplacée par la valeur moyenne (pour l'individu considéré) des  $x$  variables les plus corrélées à celle dont la valeur est manquante ; le nombre  $x$  peut prendre différentes valeurs, nous testons alors les cas  $x = 5$  (nous appelons ce traitement E5) et  $x = 10$  (nous appelons ce traitement E10) ;
- **F** : la valeur manquante est remplacée par la valeur moyenne (pour l'individu considéré) des variables dont la corrélation avec celle dont la valeur est manquante est supérieure à  $x$  ; le seuil  $x$  peut prendre différentes valeurs, nous testons alors les cas  $x = 0,8$  (nous appelons ce traitement F0.8) et  $x = 0,9$  (nous appelons ce traitement F0.9).

Rappelons que dans notre contexte, pour notre jeu d'étude, les individus sont des journées et les variables les valeurs des différentes stations de mesure. Les traitements proposés en E et F sont possibles dans notre contexte car toutes les variables sont du même type (mesure de cumul de précipitations en mm.) Remarquons aussi que dans les cas C et D, toutes les valeurs manquantes, quelles qu'elles soient, sont remplacées par la même valeur estimée (valeur unique). Dans le cas A, ce sont toutes les valeurs manquantes portant sur la même variable (i.e., la même station) qui sont remplacées par la même valeur estimée ; d'une station à l'autre (donc d'une colonne à l'autre du jeu de données), la valeur estimée sera en revanche différente. À l'inverse, dans les traitements E et F, chacune des valeurs estimées sera différente. Le traitement B correspond à une version particulière de E ; il correspond à  $E_n$  où  $n$  représente le nombre total de variables du jeu de données.

Pour le calcul des corrélations entre les variables, à partir d'un jeu de données présentant des données manquantes, plusieurs solutions sont envisageables :

- exclure toutes les observations qui possèdent au moins une valeur manquante. Cela peut par contre présenter ses limites si les valeurs manquantes sont distribuées aléatoirement dans les données, car toutes les observations peuvent être supprimées.
- Ignorer les cellules à valeur manquante. Cela fonctionne bien si les valeurs manquantes sont distribuées aléatoirement, mais cela peut aussi générer d'importants biais.
- Remplacer au préalable les valeurs manquantes par la moyenne de la variable correspondante ; i.e., faire une étape préalable de comblement des valeurs manquantes par la méthode A que nous proposons ci-dessus.

Pour ces travaux, nous préférons donc utiliser la première proposition. Cela évite en effet de générer des biais et toutes les corrélations sont alors issues du même ensemble d'observations. De plus, nos données, EDF-DTG, sont faiblement impactées par les valeurs manquantes, ce qui nous permet de ne pas rencontrer la situation où toutes les observations seraient supprimées.

La section suivante présente la mise en œuvre sur un jeu de données réel des six méthodes présentées. Elle en analyse alors l'impact sur les résultats du premier niveau de classification (i.e., séquence ACP → CAH → K-means) exploité dans nos développements.

## C.2 Cas d'un jeu de données réel, comportant des données manquantes

Dans ce cas, nous n'avons pas de vérité terrain permettant de comparer les valeurs estimées par les différentes méthodes de gestion des données manquantes aux valeurs réelles attendues. Nous comparons alors, pour les différentes méthodes de gestion des valeurs manquantes, les résultats de la séquence ACP → CAH → K-means afin d'identifier l'impact éventuel des différentes méthodes utilisées sur le résultat.

Le jeu de données étudié ici contient les journées de janvier à mars 2018 avec les informations de 93 stations de mesure. Il comporte donc 90 individus (journées) et 93 variables (stations), soit 8370 cellules.

Ce jeu de données est entaché de 57 valeurs manquantes, soit moins de 1% des données totales (environ 0,7%).

Nous avons alors produit les jeux de données complétés par les huit méthodes ci-dessus. Notons que seulement sept jeux de données complétés ont pu être véritablement générés (A, B, C, D, E5, E10 et F0,8) car lors du traitement d'au moins une donnée manquante, aucune station n'était corrélée à plus de 0,9 avec la variable considérée. Ainsi, le traitement des valeurs manquantes selon la méthode F0,9 sur ce jeu de données a laissé des trous dans le jeu de données en sortie.

En appliquant la séquence ACP → CAH → K-means sur ces sept jeux de données complétés, nous avons toujours obtenu les mêmes résultats, i.e., que nous avons obtenus sept fois les mêmes classes. Nous pouvons donc en conclure que la méthode utilisée pour traiter les valeurs manquantes, dans ce contexte, est négligeable. Quelle que soit la méthode utilisée, en effet, le résultat obtenu en sortie de la séquence de classification est le même. Il est utile de préciser que ceci est vrai dans ce contexte, i.e., sur un jeu de données où les données manquantes s'élèvent à moins de 1% du total des données ; les résultats pourraient être différents si la proportion de données manquantes augmente. Ainsi, pour nos développements basés sur les données EDF-DTG, le traitement des données manquantes semble sans influence.

De plus, pour notre application, nous pensons que l'estimation des valeurs manquantes ne devraient pas se baser sur la corrélation entre les stations car :

- D'abord, deux stations peuvent être fortement corrélées pour une tendance donnée mais avoir des comportements totalement différents pour une autre tendance (i.e., pour un flux orienté différemment) ; c'est d'ailleurs ce que l'on cherche à mettre en évidence ;
- Ensuite, deux stations peuvent être fortement corrélées mais présenter des valeurs de précipitations ayant des ordres de grandeurs différents.

L'estimateur A semble plus constant et moins impacté par ces biais ; il remplace en effet les valeurs manquantes associées à une station donnée par une information issue de la seule station concernée. L'estimateur B, qui n'est autre qu'une version dégradée de E, moyenne quant-à lui les informations des différentes variables (i.e., stations) pour remplacer la valeur manquante. Puisque *in fine* nos travaux visent à différencier les comportements des différentes stations (sous différentes tendances météorologiques), nous préférons conserver, sur chaque valeur, des informations propres à une unique station.

### C.3 Conclusions sur la gestion des données manquantes

D'abord, les estimateurs C et D sont trop arbitraires et inadaptés. Ils pourraient être adaptés dans certains contextes, si les valeurs manquantes suivent un modèle spécifique ; par exemple, dans le cas de la défaillance d'un capteur lorsque les précipitations sont proches d'être nulles, la méthode C pourrait alors être pertinente. Ensuite, nous avons vu que l'estimateur F, avec ces seuils, est susceptible de laisser des trous dans les données. De plus, abaisser les seuils dégraderait la qualité de l'estimateur. Concernant la méthode E, nous avons montré qu'elle est soumise à plusieurs biais. En premier lieu en effet, les  $x$  variables les plus corrélées à celle impactée par la valeur manquante peuvent malgré tout n'être que très peu corrélées à cette station. Ensuite, comme évoqué ci-avant, les stations ne sont pas corrélées de la même manière sous les différentes tendances, ce qui est particulièrement important dans le cadre de notre étude, et les ordres de grandeurs des précipitations qu'elles reçoivent peuvent varier y compris pour des stations fortement corrélées. Ainsi, la méthode A a l'avantage :

- d'être plus neutre : en effet, puisque l'on cherche *in fine* à travailler sur les stations (détecter les similarités et différences entre les stations), cette méthode n'implique pas de se baser sur les valeurs des autres stations pour estimer la valeur manquante sur l'une des variables du jeu de données.
- De donner des résultats plus stables (i.e., ne pas présenter des résultats plus ou moins performants selon la tendance considérée : donner des bons résultats dans certains cas et des résultats médiocres dans d'autres puisque les stations sont soumises à différentes tendances météorologiques et peuvent être fortement corrélées sous une tendance mais totalement décorrélées sous une autre).

Remplacer une valeur manquante par la moyenne de la variable concernée ne donne donc pas une information exacte et la qualité de l'information reste moyenne. Cependant, elle a l'intérêt d'être propre à la variable concernée, tandis que les valeurs estimées par les méthodes E, F et B reposent quant à elles sur les valeurs des autres stations. Notre objectif étant d'identifier les stations qui réagissent de façon similaire selon les tendances météorologiques, il semble judicieux dans ce contexte de ne pas remplacer les valeurs manquantes à partir des valeurs d'autres stations. D'ailleurs, "*dans le cas de variables quantitatives, l'imputation la plus connue consiste à remplacer les valeurs manquantes par la moyenne de chaque variable*" [Josse2009].

Notons enfin que dans notre contexte (jeux de données faiblement impacté par les valeurs manquantes), l'utilisation des différentes méthodes n'a pas d'effet sur le résultat de la séquence ACP → CAH → K-means (ce que nous avons mis en évidence sur le jeu de 90 jours et 93 stations). L'imputation classique, qui consiste à remplacer les valeurs manquantes par la moyenne de la variable considérée est donc adaptée pour satisfaire ici les objectifs fixés.

# D

## Ensemble des règles du système

---

*Cette annexe présente l'ensemble des règles de combinaison intégrées dans le système de fusion flou multi-couches. Elle donne dans une première partie les règles associées au niveau d'agrégation  $n$  et dans une seconde partie les règles associées aux niveaux d'agrégation préalables ( $n - 1$  et  $n - 2$  propres au critère C2 Inclinaison des pentes).*

---

## D.1 Règles de combinaison de niveau n : des critères aux modes de vigilance

Cette première partie donne les 29 règles permettant d'obtenir les modes de vigilance à partir des cinq critères pris en compte dans le système. Ces règles couvrent les 430 combinaisons possibles (sur 432 combinaisons théoriques, trois d'entre elles correspondant à des situations qu'il est impossible de rencontrer en réalité). 8 règles conduisent au mode de vigilance *Détendu*, 19 règles au mode de vigilance *Alerté* et 2 au mode de vigilance *Hasardeux*. Rappelons que si les règles conduisant au mode de vigilance *Méfiant*, vu comme un mode graduel entre *Détendu* et *Alerté* ont initialement été développées, les nombreuses discussions et mises en situations réalisées dans le cadre de ces travaux ont montré que ce mode de vigilance a un statut particulier. Il s'obtient alors seulement à travers une double évaluation, *locale* et *à distance*, conduite lorsque le mode de vigilance *Détendu* est obtenu (voir Chapitre 4). Les règles propres à chacun des trois modes de vigilances (*Détendu*, *Alerté* et *Hasardeux*) sont alors présentées à travers les trois sous-sections suivantes. Elles sont exprimées en utilisant le langage FCL [Cingolani2013]. L'ensemble des explications propres à chacune des règles n'est pas détaillé, mais des explications ponctuelles sont données pour quelques règles bien identifiées.

### Règles de combinaison de niveau n conduisant au mode de vigilance *Détendu*

Présentation des 8 règles conduisant au mode de vigilance *Détendu* et intégrant 171 combinaisons possibles.

Règle 1 :

**IF** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Sure  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Detendu

Le fait que le critère C2 *Inclinaison des pentes* vaille *Situation\_Sure* signifie que, du fait du terrain, la situation est sûre, c'est-à-dire qu'elle est marquée par l'absence de pente d'inclinaison supérieure à 30° dans la zone fréquentée par le skieur, ainsi que directement en dessous ou au dessus (ou alors de façon suffisamment éloignée). Cette situation montre que le risque zéro d'avalanche est possible. Dans ce cas, le mode de vigilance est donc nécessairement *Détendu*.

Règle 2 :

**IF** (C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine **OR**  
C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Dangereuse) **AND**  
(C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Non\_Critique **OR**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Peu\_Critique) **AND**  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Nulle **AND**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Nulle **AND**  
(C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Absente **OR**  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Peu\_Efficace)  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Detendu

Règle 3 :

**IF** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine **AND**  
(C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Non\_Critique **OR**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Peu\_Critique **OR**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Moyennement\_Critique) **AND**  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Moyenne **AND**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Moyenne **AND**  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Absente  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Detendu

Règle 4 :

**IF** (C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine **OR**  
C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Dangereuse) **AND**  
(C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Non\_Critique **OR**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Peu\_Critique **OR**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Moyennement\_Critique) **AND**  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Moyenne **AND**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Nulle **AND**  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Absente  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Detendu

Règle 5 :

**IF** (C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine **OR**  
C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Dangereuse) **AND**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Moyennement\_Critique **AND**  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Nulle **AND**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Nulle **AND**  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Absente  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Detendu

Règle 6 :

**IF** (C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine **OR**  
C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Dangereuse) **AND**  
(C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Non\_Critique **OR**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Peu\_Critique **OR**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Moyennement\_Critique) **AND**  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Nulle **AND**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Moyenne **AND**  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Absente  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Detendu

Règle 7 :

**IF** (C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine **OR**  
C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Dangereuse) **AND**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Tres\_Critique **AND**  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Nulle **AND**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Nulle **AND**  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Absente  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Detendu

Dans cette situation, la pente est sujette aux avalanches de grande ampleur (puisque C2 *Inclinaison des pentes* vaut *Situation\_Dangereuse*) et des avalanches ont été observées à proximité (puisque C3 *Observations d'avalanches récentes* vaut *Situation\_Tres\_Critique*). Cependant, il y a absence de surcharge et de couche fragile enfouie (puisque les deux critères C5 *Surcharges nouvelles* et C6 *Couche fragile enfouie* valent *Nulle*). Cela signifie alors que l'utilisateur se trouve dans une pente où une avalanche s'est déjà produite, i.e., dans une pente d'ores et déjà purgée. Dans ce cas, sur cette pente précisément, le mode de vigilance est *Détendu*, à proximité, il sera beaucoup plus important, les pentes rencontrant des conditions critiques, capables de générer des avalanches.

Règle 8 :

**IF** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine **AND**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Tres\_Critique **AND**  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Moyenne **AND**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Nulle **AND**

C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie IS Absente  
THEN Mode\_Vigilance IS Detendu

### Règles de combinaison de niveau n conduisant au mode de vigilance *Alerté*

Présentation des 19 règles conduisant au mode de vigilance *Alerté* et intégrant 139 combinaisons possibles.

Règle 9 :

IF C2\_Inclinaison\_Pentes IS Situation\_Incertaine AND  
(C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte IS Forte  
OR  
C5\_Surcharges\_Nouvelles IS Forte  
OR  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie IS Tres\_Efficace)  
THEN Mode\_Vigilance IS Alerte

Dans cette situation, la présence d'une importante augmentation de température (visible dans cette règle par la valeur *Forte* attribuée au critère *C4 Augmentation de température, fonte*) indique que le manteau neigeux est fortement impacté. Cela annule alors l'aspect sécuritaire lié à l'éventuelle absence de couche fragile dans le manteau neigeux. Une avalanche de neige humide est en effet possible en l'absence de couche fragile enfouie (départ ponctuel formant une avalanche dite en forme de poire). Dans ce cas, le mode de vigilance requis est alors *Alerté*.

De même, dans cette situation, la présence d'une importante surcharge du manteau neigeux (visible dans cette règle par la valeur *Forte* attribuée au critère *C5 Surcharges nouvelles*) nous permet de suspecter la présence d'une couche fragile enfouie à la jonction entre l'ancienne surface de neige et la neige fraîche. Dans ce cas, notamment du fait de sa profondeur, l'utilisateur maîtrise mal le critère *C6 Couche fragile enfouie*. Dans la prise en compte des différents critères, nous annulons donc l'éventuel aspect sécuritaire induit par la possibilité d'attribuer la valeur *Absente* à C6, caractérisant l'absence de couche fragile dans le manteau neigeux. Par mesure de précaution, le mode de vigilance requis est alors *Alerté*.

Règle 10 :

IF C2\_Inclinaison\_Pentes IS Situation\_Incertaine AND  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes IS Moyennement\_Critique AND  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte IS Nulle AND  
(C5\_Surcharges\_Nouvelles IS Nulle OR  
C5\_Surcharges\_Nouvelles IS Moyenne) AND  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie IS Moyennement\_Efficace  
THEN Mode\_Vigilance IS Alerte

Règle 11 :

IF C2\_Inclinaison\_Pentes IS Situation\_Incertaine AND  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes IS Moyennement\_Critique AND  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte IS Moyenne AND  
C5\_Surcharges\_Nouvelles IS Moyenne AND  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie IS Peu\_Efficace  
THEN Mode\_Vigilance IS Alerte

Règle 12 :

IF C2\_Inclinaison\_Pentes IS Situation\_Incertaine AND  
(C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes IS Situation\_Non\_Critique OR  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes IS Situation\_Peu\_Critique OR  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes IS Situation\_Moyennement\_Critique) AND

C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Moyenne **AND**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Moyenne **AND**  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Moyennement\_Efficace  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Alerte

Règle 13 :

**IF** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Dangereuse **AND**  
(C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Non\_Critique **OR**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Peu\_Critique **OR**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Moyennement\_Critique) **AND**  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Moyenne **AND**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Moyenne **AND**  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Peu\_Efficace  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Alerte

Dans cette situation, et notamment dans le cas où C3 *Observations d'avalanches récentes* vaut *Situation\_Non\_Critique*, la règle couvre une certaine anticipation, permise par les valeurs prises par les autres critères renseignant les conditions. S'il n'y a pas d'observation d'avalanche récente, il est possible de supposer que l'utilisateur est le premier à venir sur le terrain et qu'il n'y a seulement pas *encore* d'observation d'avalanche récente. La présence d'une couche fragile enfouie, de surcharges nouvelles ainsi que d'une augmentation de température, le tout sur un terrain sujet aux avalanches et pouvant générer des avalanches de grande ampleur, suggère en effet un niveau de danger élevé et le déclenchement ou l'observation d'avalanches à venir. C'est pourquoi le mode de vigilance *Alerté* est requis dans cette situation.

Règle 14 :

**IF** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Dangereuse **AND**  
(C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Non\_Critique **OR**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Peu\_Critique **OR**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Moyennement\_Critique) **AND**  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Moyenne **AND**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Moyenne **AND**  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Absente  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Alerte

Règle 15 :

**IF** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Dangereuse **AND**  
(C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Non\_Critique **OR**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Peu\_Critique **OR**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Moyennement\_Critique) **AND**  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Nulle **AND**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Moyenne **AND**  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Peu\_Efficace  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Alerte

Règle 16 :

**IF** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Dangereuse **AND**  
(C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Non\_Critique **OR**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Peu\_Critique **OR**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Moyennement\_Critique) **AND**  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Moyenne **AND**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Nulle **AND**  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Peu\_Efficace  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Alerte

Règle 17 :

**IF** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine **AND**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Moyennement\_Critique **AND**  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Moyenne **AND**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Nulle **AND**  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Moyennement\_Efficace  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Alerte

Règle 18 :

**IF** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Dangereuse **AND**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Moyennement\_Critique **AND**  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Nulle **AND**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Nulle **AND**  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Peu\_Efficace  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Alerte

Règle 19 :

**IF** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine **AND**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Tres\_Critique **AND**  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Nulle **AND**  
(C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Nulle **OR**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Moyenne) **AND**  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Moyennement\_Efficace  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Alerte

Règle 20 :

**IF** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine **AND**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Tres\_Critique **AND**  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Moyenne **AND**  
(C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Nulle **OR**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Moyenne) **AND**  
(C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Peu\_Efficace **OR**  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Moyennement\_Efficace)  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Alerte

Règle 21 :

**IF** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine **AND**  
(C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Non\_Critique **OR**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Peu\_Critique) **AND**  
(C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Nulle **OR**  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Moyenne) **AND**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Nulle **AND**  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Moyennement\_Efficace  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Alerte

Cette règle, par opposition à la Règle 2 ci-avant, illustre l'importance du rôle de la couche fragile enfouie dans le manteau neigeux. Ici, avec une situation incertaine en ce qui concerne la pente, non critique en ce qui concerne les observations d'avalanches récentes, sans surcharges ni augmentation de température ou fonte mais en présence d'une couche fragile active dans le manteau neigeux (puisque C6 *Couche fragile enfouie* prend la valeur *Moyennement\_Efficace* caractérisant une propagation moyenne), les conditions conduisent au mode de vigilance *Alerté*. Par opposition, l'absence de couche fragile dans le manteau neigeux conduit, pour ces mêmes conditions, à un mode de vigilance *Détendu* (voir Règle 2 où C6 *Couche fragile enfouie* vaut *Absente*).

Règle 22 :

**IF** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine **AND**  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Nulle **AND**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Moyenne **AND**  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Peu\_Efficace  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Alerte

Règle 23 :

**IF** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine **AND**  
(C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Non\_Critique **OR**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Peu\_Critique) **AND**  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Nulle **AND**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Moyenne **AND**  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Moyennement\_Efficace  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Alerte

Règle 24 :

**IF** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine **AND**  
(C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Non\_Critique **OR**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Peu\_Critique **OR**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Moyennement\_Critique) **AND**  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Moyenne **AND**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Nulle **AND**  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Peu\_Efficace  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Alerte

Règle 25 :

**IF** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine **AND**  
(C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Non\_Critique **OR**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Peu\_Critique) **AND**  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Moyenne **AND**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Moyenne **AND**  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Peu\_Efficace  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Alerte

Règle 26 :

**IF** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine **AND**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Moyennement\_Critique **AND**  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Nulle **AND**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Nulle **AND**  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Peu\_Efficace  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Alerte

Règle 27 :

**IF** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine **AND**  
C3\_Observations\_Avalanches\_Recentes **IS** Situation\_Tres\_Critique **AND**  
C4\_Augmentation\_Temperature\_Fonte **IS** Moyenne **AND**  
C5\_Surcharges\_Nouvelles **IS** Moyenne **AND**  
C6\_Couche\_Fragile\_Enfouie **IS** Absente  
**THEN** Mode\_Vigilance **IS** Alerte

Dans cette situation, du fait d'une surcharge nouvelle de l'ordre de 20-30 cm de neige fraîche (puisque C5 *Surcharges nouvelles* vaut *Moyenne*) et de la fonte du manteau neigeux en surface (puisque C4 *Augmentation de température, fonte* vaut *Moyenne*), alors des avalanches de neige humide, caractérisées par un départ ponctuel formant des avalanches dites en forme de poire, sont

possibles ; ces avalanches ne nécessitent pas la présence d'une couche fragile enfouie et active dans le manteau neigeux. Dans ce cadre, le mode de vigilance *Alerté* est adapté à la situation.

### Règles de combinaison de niveau *n* conduisant au mode de vigilance *Hasardeux*

Présentation des 2 règles conduisant au mode de vigilance *Hasardeux* et intégrant 119 combinaisons possibles.

Un prérequis est nécessaire à l'obtention du mode de vigilance *Hasardeux* : le critère *C2 Inclinaison des pentes* doit valoir *Situation\_Dangereuse*, caractérisant un terrain susceptible de générer des avalanches de grandes ampleurs.

Règle 28 :

```
IF C2_Inclinaison_Pentes IS Situation_Dangereuse AND
  C3_Observations_Avalanches_Recentes IS Situation_Tres_Critique AND
  ((C4_Augmentation_Temperature_Fonte IS Moyenne OR
  C4_Augmentation_Temperature_Fonte IS Forte)
  OR
  (C5_Surcharges_Nouvelles IS Moyenne OR
  C5_Surcharges_Nouvelles IS Forte)
  OR
  (C6_Couche_Fragile_Enfouie IS Peu_Efficace OR
  C6_Couche_Fragile_Enfouie IS Moyennement_Efficace OR
  C6_Couche_Fragile_Enfouie IS Tres_Efficace))
THEN Mode_Vigilance IS Hasardeux
```

Règle 29 :

```
IF C2_Inclinaison_Pentes IS Situation_Dangereuse AND
  (C3_Observations_Avalanches_Recentes IS Situation_Non_Critique OR
  C3_Observations_Avalanches_Recentes IS Situation_Peu_Critique OR
  C3_Observations_Avalanches_Recentes IS Situation_Moyennement_Critique) AND
  (C4_Augmentation_Temperature_Fonte IS Forte
  OR
  C5_Surcharges_Nouvelles IS Forte
  OR
  (C6_Couche_Fragile_Enfouie IS Moyennement_Efficace OR
  C6_Couche_Fragile_Enfouie IS Tres_Efficace))
THEN Mode_Vigilance IS Hasardeux
```

Les explications relatives aux combinaisons exploitant les critères *C4 Augmentation de température, fonte* et *C5 Surcharges nouvelles* rejoignent les explications données sur la règle 9. À cela s'ajoute le fait que le critère *C2 Inclinaison des pentes* vaut *Situation\_Dangereuse* (et non plus *Situation\_Incertaine*), signifiant que des avalanches de grande ampleur sont possibles. Le mode de vigilance adapté est donc le mode de vigilance *Hasardeux*.

Dans la dernière situation caractérisée par cette règle, des pentes en mesure de produire des avalanches de grande ampleur sont associées à la présence d'une couche fragile enfouie et active dans le manteau neigeux (puisque *C2 Inclinaison des pentes* vaut *Situation\_Dangereuse* et *C6 Couche fragile enfouie* vaut *Tres\_Efficace*). C'est le critère lié à la couche fragile qui joue ici un rôle très important, régissant la capacité du manteau neigeux à effectivement produire des avalanches de grande ampleur. Cette combinaison correspond typiquement aux situations dans lesquelles de grandes avalanches sont observées en Norvège, ce qui conduit donc à l'obtention du mode de vigilance *Hasardeux*.

## D.2 Règles de combinaison des niveaux préalables

Cette seconde partie donne l'ensemble des règles relatives aux niveaux de combinaison préalables (niveaux  $n-1$  et  $n-2$ ).

### D.2.1 Règles de combinaison du niveau $n-1$ : des sous-critères au critère C2

Cette section donne l'ensemble des règles permettant d'évaluer le critère C2 *Inclinaison des pentes* à partir des sept sous-critères qui le composent. Il s'agit donc des règles obtenues à l'issue de la phase d'amélioration continue présentée en Section 4.3.2 du Chapitre 4, incluant le sous-critère C2.7 *Surface mobilisable*. Ces règles couvrent les 66 combinaisons possibles. Certaines des combinaisons théoriques sont en effet impossibles dans la réalité (voir exemple 1, Tableau D.1, si les pentes en amont ne sont pas d'une inclinaison permettant le déclenchement d'une avalanche, il est impossible qu'une avalanche puisse atteindre le skieur). D'autres sont impossibles dans le système car certains sous-critères ne sont pas questionnés dans le cas où les pentes fréquentées sont d'inclinaison supérieure à 30° (voir exemple 2, Tableau D.1).

	Exemple 1	Exemple 2
<b>C2.1 CLPA</b>	Oui	Oui
<b>C2.2 Pentes fréquentées</b>	Pentes non-avalancheuses	Pentes avalancheuses
<b>C2.3 Pentes en amont</b>	Pentes non-avalancheuses	Pentes avalancheuses
<b>C2.4 Peut atteindre le skieur</b>	Oui (position dangereuse)	Position intermédiaire
<b>C2.5 Pentes en aval</b>	Pentes avalancheuses	Pentes avalancheuses
<b>C2.6 Peut emporter le skieur</b>	Non (position sûre)	Position intermédiaire
<b>C2.7 Surface mobilisable</b>	Faible	Faible

Les cellules à fond rouge indiquent les sous-critères incompatibles, rendant la situation impossible en réalité (exemple 1) ou les sous-critères non-enseignés rendant la situation impossible dans le système (exemple 2).

Tableau D.1 – Exemples de combinaisons impossibles

Les règles sont exprimées en utilisant le langage FCL [Cingolani2013].

Règle 2-1 :

```
IF C2.2_Pentes_Frequentees IS Pentes_Non_Avalancheuses AND
   C2.3_Pentes_Amont IS Pentes_Non_Avalancheuses AND
   C2.5_Pentes_Aval IS Pentes_Non_Avalancheuses
THEN C2_Inclinaison_Pentes IS Situation_Sure
```

Règle 2-2 :

```
IF C2.1_CLPA IS Non AND
   C2.2_Pentes_Frequentees IS Pentes_Non_Avalancheuses AND
   C2.3_Pentes_Amont IS Pentes_Avalancheuses AND
   C2.4_Peut_Atteindre_Skieur IS Non_Position_Sure AND
   C2.5_Pentes_Aval IS Pentes_Non_Avalancheuses
THEN C2_Inclinaison_Pentes IS Situation_Sure
```

Règle 2-3 :

```
IF C2.1_CLPA IS Non AND
   C2.2_Pentes_Frequentees IS Pentes_Non_Avalancheuses AND
   C2.3_Pentes_Amont IS Pentes_Avalancheuses AND
   C2.4_Peut_Atteindre_Skieur IS Non_Position_Sure AND
```

C2.5\_Pentes\_Aval **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Non\_Position\_Sure  
**THEN** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Sure

Règle 2-4 :

**IF** C2.1\_CLPA **IS** Non **AND**  
C2.2\_Pentes\_Frequentees **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
C2.3\_Pentes\_Amont **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
C2.5\_Pentes\_Aval **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Non\_Position\_Sure  
**THEN** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Sure

Règle 2-5 :

**IF** C2.1\_CLPA **IS** Non **AND**  
C2.2\_Pentes\_Frequentees **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
C2.3\_Pentes\_Amont **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.4\_Peut\_Atteindre\_Skieur **IS** Position\_Intermediaire **AND**  
C2.5\_Pentes\_Aval **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses  
**THEN** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine

Règle 2-6 :

**IF** C2.1\_CLPA **IS** Non **AND**  
C2.2\_Pentes\_Frequentees **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
C2.3\_Pentes\_Amont **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.4\_Peut\_Atteindre\_Skieur **IS** Position\_Intermediaire **AND**  
C2.5\_Pentes\_Aval **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Position\_Intermediaire  
**THEN** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine

Règle 2-7 :

**IF** C2.1\_CLPA **IS** Non **AND**  
C2.2\_Pentes\_Frequentees **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
C2.3\_Pentes\_Amont **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.4\_Peut\_Atteindre\_Skieur **IS** Position\_Intermediaire **AND**  
C2.5\_Pentes\_Aval **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Non\_Position\_Sure  
**THEN** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine

Règle 2-8 :

**IF** C2.1\_CLPA **IS** Non **AND**  
C2.2\_Pentes\_Frequentees **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
C2.3\_Pentes\_Amont **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
C2.5\_Pentes\_Aval **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Position\_Intermediaire  
**THEN** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine

Règle 2-9 :

**IF** C2.1\_CLPA **IS** Non **AND**  
C2.2\_Pentes\_Frequentees **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
C2.3\_Pentes\_Amont **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.4\_Peut\_Atteindre\_Skieur **IS** Non\_Position\_Sure **AND**  
C2.5\_Pentes\_Aval **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Position\_Intermediaire

**THEN C2\_Inclinaison\_Pentes IS Situation\_Incertaine**

Règle 2-10 :

**IF C2.1\_CLPA IS Oui AND**  
C2.2\_Pentes\_Frequentees **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
C2.3\_Pentes\_Amont **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.4\_Peut\_Atteindre\_Skieur **IS** Non\_Position\_Sure **AND**  
C2.5\_Pentes\_Aval **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses  
**THEN C2\_Inclinaison\_Pentes IS Situation\_Incertaine**

Règle 2-11 :

**IF C2.1\_CLPA IS Oui AND**  
C2.2\_Pentes\_Frequentees **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
C2.3\_Pentes\_Amont **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
C2.5\_Pentes\_Aval **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Non\_Position\_Sure  
**THEN C2\_Inclinaison\_Pentes IS Situation\_Incertaine**

Règle 2-12 :

**IF C2.1\_CLPA IS Oui AND**  
C2.2\_Pentes\_Frequentees **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
C2.3\_Pentes\_Amont **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.4\_Peut\_Atteindre\_Skieur **IS** Non\_Position\_Sure **AND**  
C2.5\_Pentes\_Aval **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Non\_Position\_Sure  
**THEN C2\_Inclinaison\_Pentes IS Situation\_Incertaine**

Règle 2-13 :

**IF C2.2\_Pentes\_Frequentees IS Pentes\_Avalancheuses AND**  
C2.7\_Surface\_Mobilisable **IS** Faible  
**THEN C2\_Inclinaison\_Pentes IS Situation\_Incertaine**

Règle 2-14 :

**IF C2.2\_Pentes\_Frequentees IS Pentes\_Non\_Avalancheuses AND**  
**((C2.3\_Pentes\_Amont IS Pentes\_Avalancheuses AND**  
C2.4\_Peut\_Atteindre\_Skieur **IS** Oui\_Position\_Dangereuse)  
**OR**  
(C2.5\_Pentes\_Aval **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Oui\_Position\_Dangereuse)) **AND**  
C2.7\_Surface\_Mobilisable **IS** Faible  
**THEN C2\_Inclinaison\_Pentes IS Situation\_Incertaine**

Règle 2-15 :

**IF C2.1\_CLPA IS Oui AND**  
C2.2\_Pentes\_Frequentees **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
C2.3\_Pentes\_Amont **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.4\_Peut\_Atteindre\_Skieur **IS** Position\_Intermediaire **AND**  
C2.5\_Pentes\_Aval **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
C2.7\_Surface\_Mobilisable **IS** Faible  
**THEN C2\_Inclinaison\_Pentes IS Situation\_Incertaine**

Règle 2-16 :

**IF C2.1\_CLPA IS Oui AND**  
C2.2\_Pentes\_Frequentees **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
C2.3\_Pentes\_Amont **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**

C2.5\_Pentes\_Aval **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Position\_Intermediaire **AND**  
C2.7\_Surface\_Mobilisable **IS** Faible  
**THEN** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine

Règle 2-17 :

**IF** C2.1\_CLPA **IS** Oui **AND**  
C2.2\_Pentes\_Frequentees **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
C2.3\_Pentes\_Amont **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.4\_Peut\_Atteindre\_Skieur **IS** Position\_Intermediaire **AND**  
C2.5\_Pentes\_Aval **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Non\_Position\_Sure **AND**  
C2.7\_Surface\_Mobilisable **IS** Faible  
**THEN** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine

Règle 2-18 :

**IF** C2.1\_CLPA **IS** Oui **AND**  
C2.2\_Pentes\_Frequentees **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
C2.3\_Pentes\_Amont **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
(C2.4\_Peut\_Atteindre\_Skieur **IS** Non\_Position\_Sure **OR**  
C2.4\_Peut\_Atteindre\_Skieur **IS** Position\_Intermediaire) **AND**  
C2.5\_Pentes\_Aval **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Position\_Intermediaire **AND**  
C2.7\_Surface\_Mobilisable **IS** Faible  
**THEN** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Incertaine

Règle 2-19 :

**IF** C2.2\_Pentes\_Frequentees **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.7\_Surface\_Mobilisable **IS** Grande  
**THEN** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Dangereuse

Règle 2-20 :

**IF** C2.2\_Pentes\_Frequentees **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
((C2.3\_Pentes\_Amont **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.4\_Peut\_Atteindre\_Skieur **IS** Oui\_Position\_Dangereuse)  
**OR**  
(C2.5\_Pentes\_Aval **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Oui\_Position\_Dangereuse)) **AND**  
C2.7\_Surface\_Mobilisable **IS** Grande  
**THEN** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Dangereuse

Règle 2-21 :

**IF** C2.1\_CLPA **IS** Oui **AND**  
C2.2\_Pentes\_Frequentees **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
C2.3\_Pentes\_Amont **IS** Pentes\_Avalancheuses **AND**  
C2.4\_Peut\_Atteindre\_Skieur **IS** Position\_Intermediaire **AND**  
C2.5\_Pentes\_Aval **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
C2.7\_Surface\_Mobilisable **IS** Grande  
**THEN** C2\_Inclinaison\_Pentes **IS** Situation\_Dangereuse

Règle 2-22 :

**IF** C2.1\_CLPA **IS** Oui **AND**  
C2.2\_Pentes\_Frequentees **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**  
C2.3\_Pentes\_Amont **IS** Pentes\_Non\_Avalancheuses **AND**

C2.5\_Pentes\_Aval IS Pentes\_Avalancheuses AND  
 C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur IS Position\_Intermediaire AND  
 C2.7\_Surface\_Mobilisable IS Grande  
**THEN** C2\_Inclinaison\_Pentes IS Situation\_Dangereuse

Règle 2-23 :

**IF** C2.1\_CLPA IS Oui AND  
 C2.2\_Pentes\_Frequentees IS Pentes\_Non\_Avalancheuses AND  
 C2.3\_Pentes\_Amont IS Pentes\_Avalancheuses AND  
 C2.4\_Peut\_Atteindre\_Skieur IS Position\_Intermediaire AND  
 C2.5\_Pentes\_Aval IS Pentes\_Avalancheuses AND  
 C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur IS Non\_Position\_Sure AND  
 C2.7\_Surface\_Mobilisable IS Grande  
**THEN** C2\_Inclinaison\_Pentes IS Situation\_Dangereuse

Règle 2-24 :

**IF** C2.1\_CLPA IS Oui AND  
 C2.2\_Pentes\_Frequentees IS Pentes\_Non\_Avalancheuses AND  
 C2.3\_Pentes\_Amont IS Pentes\_Avalancheuses AND  
 (C2.4\_Peut\_Atteindre\_Skieur IS Non\_Position\_Sure OR  
 C2.4\_Peut\_Atteindre\_Skieur IS Position\_Intermediaire) AND  
 C2.5\_Pentes\_Aval IS Pentes\_Avalancheuses AND  
 C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur IS Position\_Intermediaire AND  
 C2.7\_Surface\_Mobilisable IS Grande  
**THEN** C2\_Inclinaison\_Pentes IS Situation\_Dangereuse

## D.2.2 Règles de combinaison du niveau $n-2$ : des paramètres au sous-critère C2.6

Cette section donne l'ensemble des règles permettant d'évaluer le sous-critère C2.6 *Peut emporter le skieur* à partir des deux paramètres qui le composent. Ces règles couvrent les 20 combinaisons possibles.

Les règles sont exprimées en utilisant le langage FCL [Cingolani2013].

Règle 2.6-1 :

**IF** (C2.6<sub>1</sub>\_Distance IS 5m OR  
 C2.6<sub>1</sub>\_Distance IS 10m OR  
 C2.6<sub>1</sub>\_Distance IS 20m OR  
 C2.6<sub>1</sub>\_Distance IS >30m) AND  
 C2.6<sub>2</sub>\_Inclinaison IS ≤15°  
**THEN** C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur IS Non\_Position\_Sure

Règle 2.6-2 :

**IF** (C2.6<sub>1</sub>\_Distance IS 20m OR  
 C2.6<sub>1</sub>\_Distance IS >30m) AND  
 C2.6<sub>2</sub>\_Inclinaison IS 25°  
**THEN** C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur IS Non\_Position\_Sure

Règle 2.6-3 :

**IF** C2.6<sub>1</sub>\_Distance IS >30m AND  
 C2.6<sub>2</sub>\_Inclinaison IS 28°  
**THEN** C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur IS Non\_Position\_Sure

Règle 2.6-4 :

**IF** (C2.6<sub>1</sub>\_Distance IS 5m OR  
 C2.6<sub>1</sub>\_Distance IS 10m) AND

C2.6<sub>2</sub>\_Inclinaison **IS** 25°  
**THEN** C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Position\_Intermediaire

Règle 2.6-5 :

**IF** C2.6<sub>1</sub>\_Distance **IS** 20m **AND**  
C2.6<sub>2</sub>\_Inclinaison **IS** 28°  
**THEN** C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Position\_Intermediaire

Règle 2.6-6 :

**IF** C2.6<sub>1</sub>\_Distance **IS** 1m **AND**  
(C2.6<sub>2</sub>\_Inclinaison **IS** ≤15° **OR**  
C2.6<sub>2</sub>\_Inclinaison **IS** 25°)  
**THEN** C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Oui\_Position\_Dangereuse

Règle 2.6-7 :

**IF** (C2.6<sub>1</sub>\_Distance **IS** 1m **OR**  
C2.6<sub>1</sub>\_Distance **IS** 5m **OR**  
C2.6<sub>1</sub>\_Distance **IS** 10m) **AND**  
C2.6<sub>2</sub>\_Inclinaison **IS** 28°  
**THEN** C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Oui\_Position\_Dangereuse

Règle 2.6-8 :

**IF** C2.6<sub>2</sub>\_Inclinaison **IS** 30°  
**THEN** C2.6\_Peut\_Emporter\_Skieur **IS** Oui\_Position\_Dangereuse

# E

## Publications

---

*Cette annexe liste les rapports techniques et publications auxquels ces travaux ont donné lieu et dont je suis auteure ou co-auteure.*

---

## E.1 Livrables du projet CIME

[1] F. Pourraz, F. Pagnier, H. Verjus, et A. Duclos, « Définition de l’approche et des outils méthodologiques », WP2.a.V1 – Livrable 2.1.1, sept. 2019.

[2] F. Pagnier, F. Pourraz, et H. Verjus, « Définition de l’approche et des outils méthodologiques », WP2.a.V2-Livrable 2.2.1, sept. 2020.

[3] F. Pagnier, F. Pourraz, H. Verjus, D. Coquin, et G. Mauris, « Définition de l’approche et des outils méthodologiques », WP2.a.V3-Livrable 2.3.1, sept. 2021.

## E.2 Publications dans des conférences

[1] F. Pagnier, D. Coquin, F. Pourraz, H. Verjus, et G. Mauris, « Classification des précipitations sur les massifs alpins français », in ORASIS 2021, Saint Ferréol, France, sept. 2021. Consulté le : 11 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03339626>

[2] F. Pagnier, F. Pourraz, G. Mauris, D. Coquin, et H. Verjus, « Fuzzification de la distance d’arrêt des avalanches dans les Alpes françaises pour l’aide à la décision en ski de randonnée », présenté à LFA 2021 - Rencontres francophones sur la Logique Floue et ses Applications, oct. 2021, p. 77. Consulté le : 12 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://hal.univ-smb.fr/hal-03541353>

[3] F. Pagnier, F. Pourraz, H. Verjus, D. Coquin, et G. Mauris, « A Global System for Avalanche Risk Assessment », in 2022 IEEE 24th Conference on Business Informatics (CBI), Amsterdam, Netherlands : IEEE, juin 2022, p. 57-64. doi : 10.1109/CBI54897.2022.10049.

[4] F. Pagnier, F. Pourraz, D. Coquin, H. Verjus, et G. Mauris, « A Multilevel Clustering Method for Risky Areas in the Context of Avalanche Danger Management », in The 19th International conference on Information Processing and Management of Uncertainty in knowledge-based systems (IPMU 2022), Milan, Italy, juill. 2022, p. 54. doi : 10.1007/978-3-031-08974-9\_5.



# Méthode d'aide à la décision pour caractériser la vigilance requise en terrain avalancheux

---

## Résumé

La pratique des sports de montagne est soumise au risque d'avalanche. En France, les avalanches provoquent en effet une trentaine de décès chaque années parmi les pratiquants de ski de randonnée, ski hors piste et alpinisme. Dans ce contexte, l'intention de ces travaux est de contribuer à l'amélioration de l'aide à la décision face au risque d'avalanche afin de réduire au maximum le nombre d'accidents et d'incidents qui se produisent chaque année. Pour cela, nous explicitons et tentons de répondre aux différents besoins utiles à l'amélioration des méthodes d'aide à la décision existantes.

Les travaux de recherche entrepris portent donc plus spécifiquement sur les motivations suivantes :

- identifier, formaliser et évaluer les informations à prendre en considération dans l'estimation de la situation avalancheuse en cours ;
- déterminer un résultat final caractérisant la vigilance requise par le pratiquant face à la situation avalancheuse locale.

Ainsi, dans le but d'aider les professionnels de la montagne dans leurs prises de décisions quotidiennes, notre objectif principal est de prendre en compte des informations hétérogènes et multi-sources, de les combiner et de communiquer un niveau de vigilance sur lequel l'utilisateur pourra conduire son analyse et prendre sa décision. Ces travaux mettent en particulier en œuvre une méthode de fusion d'informations incertaines afin d'agrèger de multiples critères hétérogènes, entre autres issus d'observations de terrain. Ce niveau de vigilance à adopter localement, tout au long d'un itinéraire de ski de montagne, devra également être explicable. Nos développements visent alors à reproduire la connaissance experte, en restant proche du raisonnement des experts et en exploitant les termes qu'ils emploient.

**Mots-clés** : Évaluation du risque, Méthode de fusion, Données incertaines et imprécises

---

## Abstract

Mountain sports are subject to avalanche risk. In France, avalanches cause about 30 deaths annually among ski tourers, off-road skiers and mountaineers. This work aims to improve decision support to minimize the number of accidents and incidents arising in avalanche terrain each year. To this end, we make clear the requirements needed in order to improve the existing decision support methods. We then propose solutions that meet these requirements.

The research undertaken focuses specifically on the following:

- to identify, formalize and evaluate the elements to consider in the avalanche situation assessment;
- to determine a final result characterizing the vigilance required by practitioners in a local avalanche situation.

To help mountain professionals in their daily decision-making, our main objective is to consider heterogeneous and multi-source information, combine them and communicate a level of vigilance on which the user will base his analysis and decide. These works will apply information fusion methods to aggregate multiple heterogeneous criteria, resulting, for example, from field observations. This vigilance level appropriate to the local ski route should also be explainable. Then, our developments aim to reproduce expert knowledge, incorporating the terms they use and being mindful of their reasonings.

**Keywords** : Risk evaluation, Fusion methods, Uncertain and inaccurate data