



Ingénieurs-conseils

**Étude des risques hydrologiques (avalanches &
crues) sur le TSD de Conche
Station de Châtel, Haute-Savoie**

Rapport

septembre 2018

Table des matières

1	Contexte nivo-météorologique	5
1.1	Données	5
1.2	Contexte climatique	6
1.3	Analyse des précipitations	8
1.3.1	Analyse des chutes de neige	8
1.3.2	Analyse des chutes de pluie	12
1.3.3	Étude des précipitations sur quelques heures	20
1.4	Analyse des orages associés à des crues	21
1.5	Épaisseur de neige au sol	23
1.6	Synthèse	25
2	Analyse du risque d’avalanche	26
2.1	Méthodes	26
2.2	Données	26
2.3	Éléments historiques	27
2.3.1	Enquête permanente sur les avalanches	27
2.3.2	Carte de localisation des phénomènes d’avalanches	28
2.3.3	Documents d’archives	31
2.4	Analyse spatiale du risque d’avalanche	33
2.4.1	Principe	33
2.4.2	Morphologie	33
2.4.3	Phénomènes	35
2.5	Synthèse	37
3	Analyse par simulation numérique des avalanches	38
3.1	Principe et hypothèses du calcul	38

3.1.1	Modèle utilisé pour le calcul	39
3.2	Résultats	40
3.2.1	Avalanches rares ($T \sim 30$ ans)	42
3.2.2	Avalanches exceptionnelles ($T \sim 100$ ans)	44
4	Analyse du risque torrentiel	47
4.1	Données et contexte	47
4.2	Contexte	48
4.2.1	Hydrographie	48
4.2.2	Géologie et fourniture en sédiment	48
4.2.3	Morphologie du lit	49
4.2.4	Type de crue	49
4.3	Historique du site	49
4.3.1	Archives	49
4.3.2	Fonds RTM	50
4.4	Évaluation hydrologique des crues torrentielles	52
4.4.1	Estimation des quantiles de débit rares à extrêmes	52
4.4.2	Synthèse	57
4.5	Modélisation hydraulique	58
4.5.1	Hypothèses du calcul	58
4.5.2	Résultats du calcul	59
4.6	Synthèse	61
4.6.1	Crue de projet	61
4.6.2	Risque sur le TSD	61
5	Synthèse	63

Objet de la note

Contexte

LA STATION DE CHÂTEL procède au remplacement du télésiège de *Conche*. L'exploitant souhaite disposer d'une étude des phénomènes d'origine hydrologique menaçant le projet. L'appareil et le périmètre de notre zone d'étude sont localisés sur la figure 1.

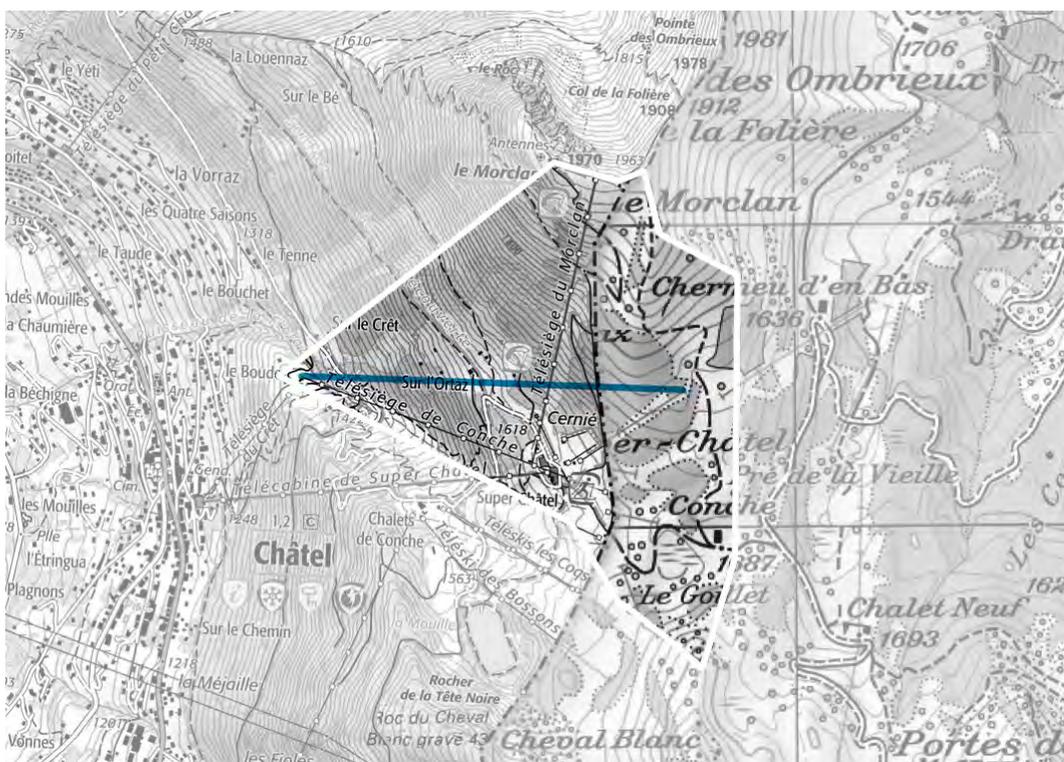


Figure 1 : localisation de l'axe de la remontée mécanique (segment bleu) et de la zone d'étude (contour blanc). Fond topographique : assemblage de données issues du Géoportail © IGN Paris 2018 et de l'Office fédéral de topographie © swisstopo. Échelle 1:25 000.

Mission

La station de Châtel demande au groupement Toraval de :

- caractériser les phénomènes d’avalanches et de crues affectant le projet de remontée mécanique ;
- dresser un tableau des efforts d’avalanches estimés sur la ligne pour la période de retour de référence choisie par le maître d’ouvrage.

Contexte nivo-météorologique

1.1 Données

L'analyse nivo-météorologique s'est appuyée sur :

- du poste nivo-météorologique de Châtel (1635 m), janvier 1985 à avril 2018, mais dont seules les données depuis 2000 sont exploitables,
- les données météorologiques du poste Météo-France de Châtel de novembre 1972 à juillet 2007. Il manque des données pour dix mois de l'année 1983. La série couvre donc en tout 35 ans de données à peu près continues ;
- des données météorologiques issues de précédentes études de Toraval dans le secteur ;
- la thèse d'A. Kiefer Weisse, « Étude des précipitations exceptionnelles de pas de temps court en relief accidenté (Alpes françaises) », thèse de doctorat INPG, Grenoble (1998) ;
- la thèse d'A. Djerboua, « Prédétermination des pluies et crues extrêmes dans les Alpes franco-italiennes. Prédiction quantitative des pluies journalières par la méthode des analogues », thèse de doctorat, INPG, Grenoble (2001).

1.2 Contexte climatique

La station de Châtel se trouve à la périphérie de l'une des zones les plus humides des Alpes du Nord en termes de précipitations annuelles et d'intensité de précipitation. Ainsi, la pluie journalière de période de retour décennale est supérieure à 70–80 mm environ dans le Chablais. Il faut chercher l'origine de ces valeurs relativement fortes par l'effet de barrière exercé par ce massif sur les flux d'ouest à nord-ouest. Toutefois, on note que :

- les valeurs mesurées sur ce secteur du Chablais sont fortes mais n'atteignent pas les pics observés en Chartreuse ou dans les Bauges. Ainsi, le cumul annuel y est de 1670 mm environ contre 2000 mm à Saint-Pierre-de-Chartreuse. De même, la pluie journalière décennale est de 85 mm contre 89 mm à Thônes et, plus au sud, 102 mm à Aillon-le-Jeune (Bauges) mais seulement 62 mm à Scientrier dans le Faucigny ;
- le Chablais et les vallées avoisinantes subissent de fortes variations spatiales dans la distribution des précipitations aussi bien en intensité qu'en cumul. Ainsi, malgré la différence significative d'altitude, il pleut autant à Saint-Gingolph au bord du lac Léman qu'à Châtel à 1200 m d'altitude alors qu'Abondance accuse un déficit de l'ordre de 25 % en termes de cumul annuel de pluie par rapport à ces deux postes ;
- la distribution spatiale est plus homogène lorsqu'on s'intéresse aux pluies sur de petits pas de temps (quelques heures). On note en effet une assez bonne homogénéité des pluies sur des temps de 1 h à 6 h sur le Chablais, le Genevois, et le Faucigny.

Nous reportons dans le tableau 1.1 les valeurs caractéristiques des précipitations sur les postes à proximité de Châtel. **On notera que Châtel présente les valeurs les plus fortes du secteur, suivi de près par Saint-Gingolph au bord du Léman.** Comme pour le Jura, l'essentiel des perturbations est amené par des flux de nord-ouest à ouest. La forme du relief et sa disposition par rapport au flux jouent un grand rôle dans la distribution des précipitations, principalement pour les épisodes de longue durée (plus de 12 h de précipitations consécutives), ce qui explique la variabilité des résultats pour cette région. De même, un tel gradient spatial de précipitation tend à rendre moins manifestes les effets de l'altitude sur les précipitations : on ne note ainsi aucune corrélation claire entre pluie journalière décennale et altitude. On analyse les données de Châtel dans ce qui suit.

Tableau 1.1 : données des différentes stations météorologiques à proximité de Châtel. Sont indiqués : l'altitude de la station, le type de mesures, la période sur laquelle la statistique des mesures a été réalisée, la pluie décennale journalière P_{10} (c'est-à-dire le cumul de pluie sur une période de 24 heures et de période de retour $T = 10$ ans) et le gradex des pluies journalières. Le gradex renseigne sur l'accroissement du cumul des précipitations en fonction de la période de retour : plus le gradex est grand, plus le cumul de précipitations des événements rares sera grand par rapport aux événements courants.

Station	Altitude (m)	Type	Intervalle	P_{10} (mm)	Gradex (mm)
Abondance Frogy	1000	pluviographe	1961–1990	72	11,3
Chamonix	1035	pluviographe	1959–1990	78	14,3
Saint-Paul-en-Chablais	880	pluviographe	1970–1983	67	11,3
Vacheresse	800	pluviographe	1970–1983	71	13,6
Châtel	1210	pluviomètre	1972–2007	86	13,0
Morzine	960	pluviomètre	1955–1995	76	12,2
Le Biot	690	pluviomètre	1959–1994	78	12,4
Les Gets	1200	pluviomètre	1959–1994	81	13,4
Saint-Gingolph	940	pluviomètre	1947–1995	83	12,8

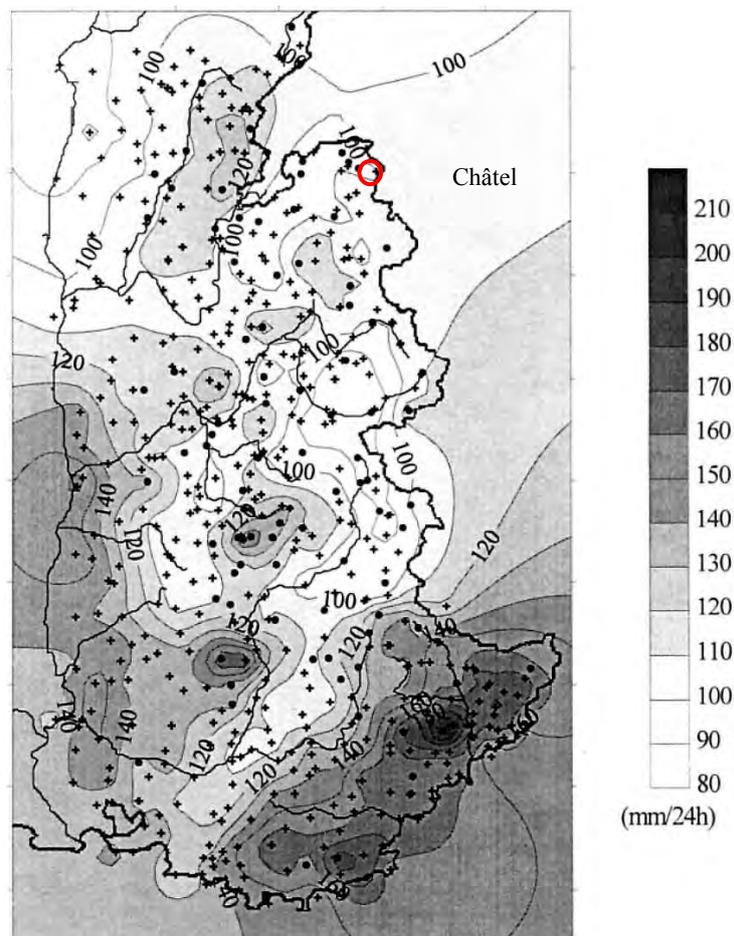


Figure 1.1 : carte des isovaleurs des précipitations journalières de période de retour 100 ans. Cette carte a été obtenue par krigeage de toutes les stations météorologiques du quart sud-est de la France. Le cercle rouge localise le secteur d'étude. D'après A. Kieffer Weisse.

1.3 Analyse des précipitations

1.3.1 Analyse des chutes de neige

Nous avons étudié une série de données couvrant la période janvier 2000 à avril 2018 sur le poste de Châtel à 1635 m d'altitude, poste distant de 15 km à vol d'oiseau des zones de départ d'avalanches menaçant la remontée mécanique projetée (et à sensiblement la même altitude).

Nous reportons sur la figure 1.2 la distribution dans le temps de ces chutes de neige journalières. On note que des chutes de neige relativement importantes (proches de 50 cm/j pour le poste de Châtel) se sont produites à plusieurs reprises. Comme le montre la figure 1.3, les cumuls mensuels de neige sont également significatifs : avec une moyenne mensuelle de 64 cm à Châtel, le cumul mensuel peut atteindre 290 cm (cumul annuel record de 664 cm en 2012-13) à Châtel.

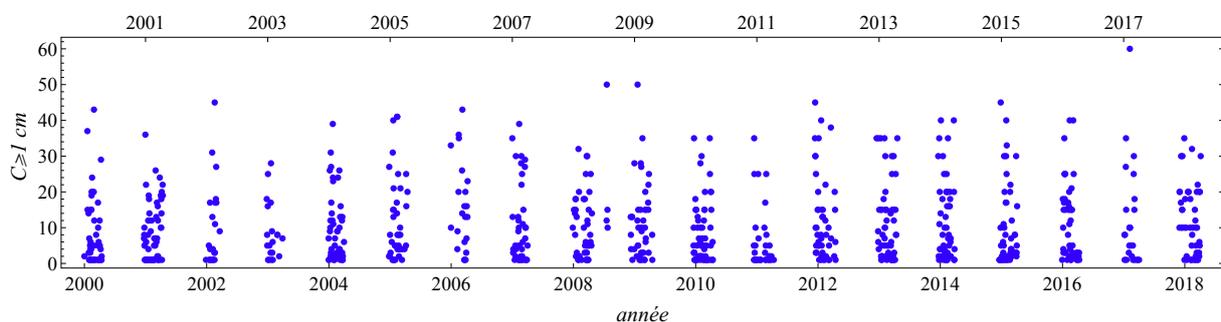


Figure 1.2 : répartition dans le temps des chutes de neige journalières sur Châtel. L'agglomération en amas de points résulte simplement du caractère saisonnier des chutes de neige. Le caractère aléatoire des chutes de neige, notamment la densité des amas et les valeurs extrêmes observées sur une saison, sont très variables d'une année à l'autre.

Les épaisseurs du manteau neigeux à 1650 m sont également significatives, avec des valeurs moyennes souvent comprises entre 1 et 2 m de neige au sol (voir figure 1.4). L'enneigement est peu uniforme d'une année sur l'autre, avec des séries d'années à fort enneigement et d'autres à faible enneigement.

Nous avons également exploité les données nivo-météorologiques pour dégager les principales caractéristiques nivo-météorologiques du site. On retiendra que :

- les gros coups de neige en moyenne observés chaque année amènent des cumuls de neige d'au moins 100 cm sur une période de 4 à 8 jours, parfois bien plus. Le record sur le poste nivo-météorologique de Châtel est celui de décembre 2011 avec 183 cm de cumul (en 18 jours) – voir tableau 1.2 ;
- un nombre extrêmement variable de chutes de neige (en moyenne 15 chutes de neige par an dépassent 10 cm) ;
- des chutes de neige bien réparties sur janvier et février. Il y a un peu moins de chutes de neige en mars ;
- des valeurs d'enneigement qui sont dans la moyenne inférieure des Alpes du Nord aussi bien pour les épisodes courants qu'extrêmes, bien loin des valeurs de certains postes de Haute-Savoie (Aiguilles Rouges et sud Chablais).

Pour évaluer les quantiles extrêmes, nous avons calé une *loi de valeurs extrêmes* par inférence bayésienne. Cette loi énonce que la probabilité des maxima tend vers une loi générale

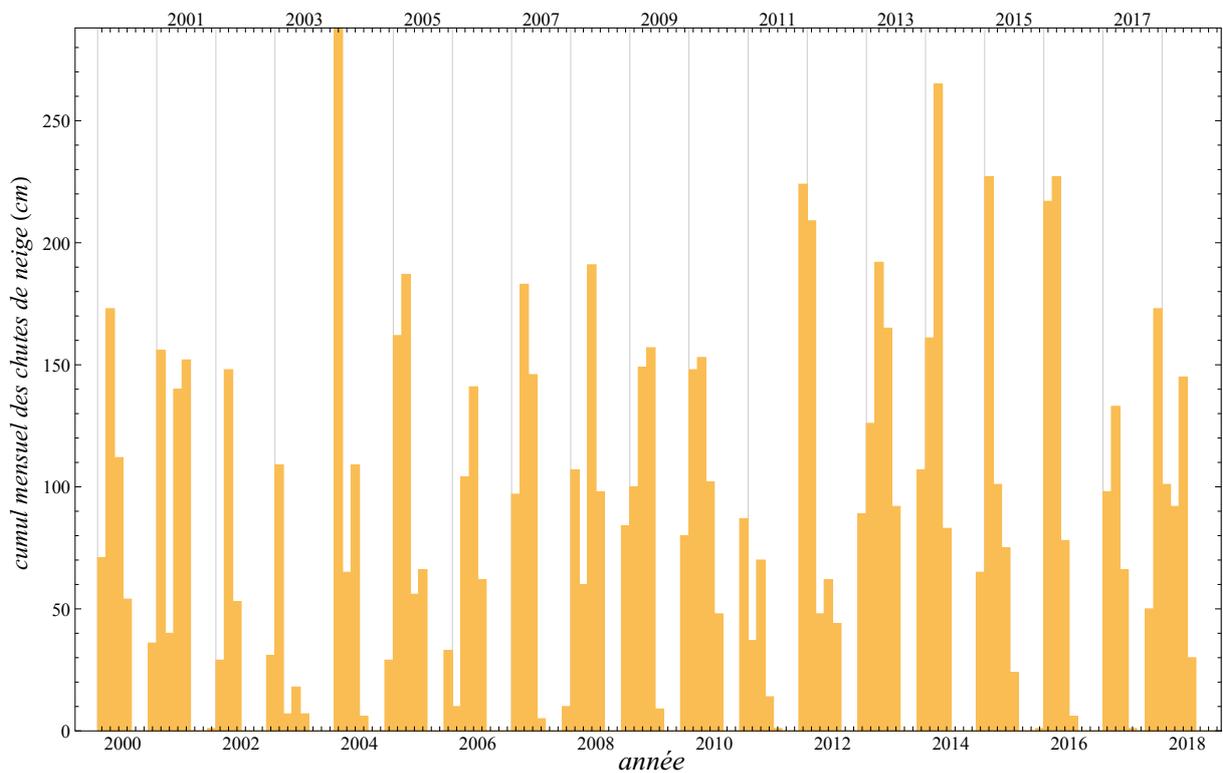


Figure 1.3 : cumuls mensuels de neige sur Châtel.

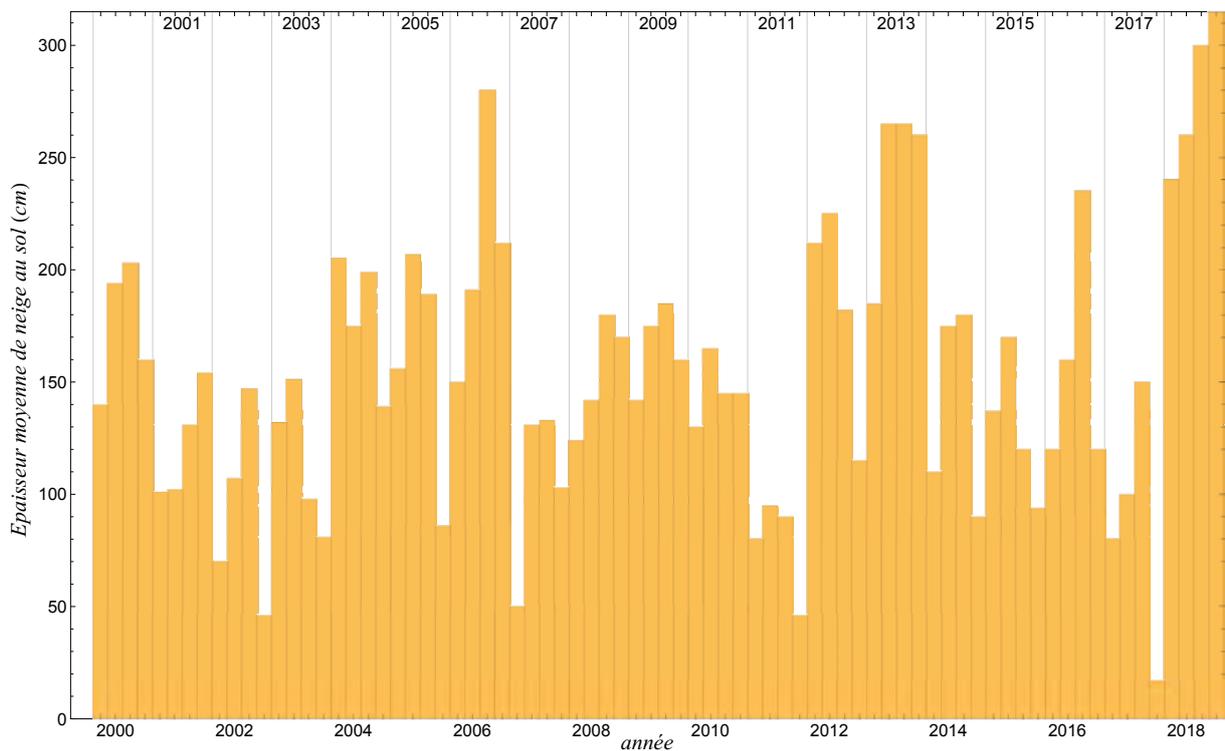


Figure 1.4 : variation de l'épaisseur maximale de neige au sol (moyenne sur un mois) à Châtel. Chaque barre représente un mois de la saison (de janvier à avril).

dont la fonction de répartition s'écrit :

$$P(C|\mu, \sigma, \xi) = \exp \left[- \left(1 + \xi \frac{C - \mu}{\sigma} \right)^{-1/\xi} \right] \quad (1.1)$$

Tableau 1.2 : liste des épisodes de neige ayant amené plus de 100 cm sur sur Châtel depuis janvier 2000 avec une estimation de la période de retour (par la méthode du renouvellement).

date	durée (j)	C (cm)	T (ans)
4 avril 2001	8	111	2
24 janvier 2004	6	111	2
23 février 2007	8	114	2
7 février 2016	9	115	2
11 février 2005	7	129	3
11 janvier 2016	6	131	4
11 janvier 2004	10	132	4
1 février 2014	13	133	4
31 janvier 2013	9	134	4
17 janvier 2005	8	137	4
6 février 2000	15	139	5
28 janvier 2015	8	149	6
14 décembre 2011	8	183	18

Elle dépend de trois paramètres : un paramètre de localisation μ , un paramètre de forme ξ , et un paramètre d'échelle σ ($\sigma > 0$). En fait, cette forme générique synthétise trois distributions élémentaires : la *loi de Gumbel* ($\xi = 0$), la *loi de Fréchet* ($\xi > 0$), et la *loi de Weibull* ($\xi < 0$). Le tableau 1.3 reporte les valeurs de cumul de neige en fonction de la période de retour T et de la durée pour Châtel. La figure 1.5 montre l'adéquation entre les mesures et les lois de valeurs extrêmes calées pour des durées de 1 j à 3 j.

Les calculs montrent que la loi de Weibull est plus adaptée pour décrire les chutes de neige journalières sur Châtel, ce que montre aussi la figure 1.5 avec un aplatissement de la tendance donnée par les mesures aux grandes périodes de retour. Pour les durées supérieures, le caractère Fréchet indique que les chutes de neige extrêmes ne sont pas dans la continuité des chutes de neige ordinaires ; il y aurait donc des mauvaises surprises à redouter d'après ce modèle.

Tableau 1.3 : estimation des cumuls de neige (en cm) tombée sur 1 à 6 jours en fonction de la période de retour (inférence bayésienne sur loi de valeurs extrêmes). Valeurs exprimées en cm pour Châtel (à 1635 m).

	1 j	2 j	3 j	4 j	5 j	6 j
μ	38,3	54,5	62,7	72,1	78,5	88,6
σ	7,04	11,6	15,4	19,3	22,1	24,6
ξ	-0,082	-0,138	0,020	0,024	0,024	-0,135
$C(T = 10)$	53	77	98	117	130	136
$C(T = 30)$	59	86	117	140	157	155
$C(T = 100)$	65	94	137	166	186	173

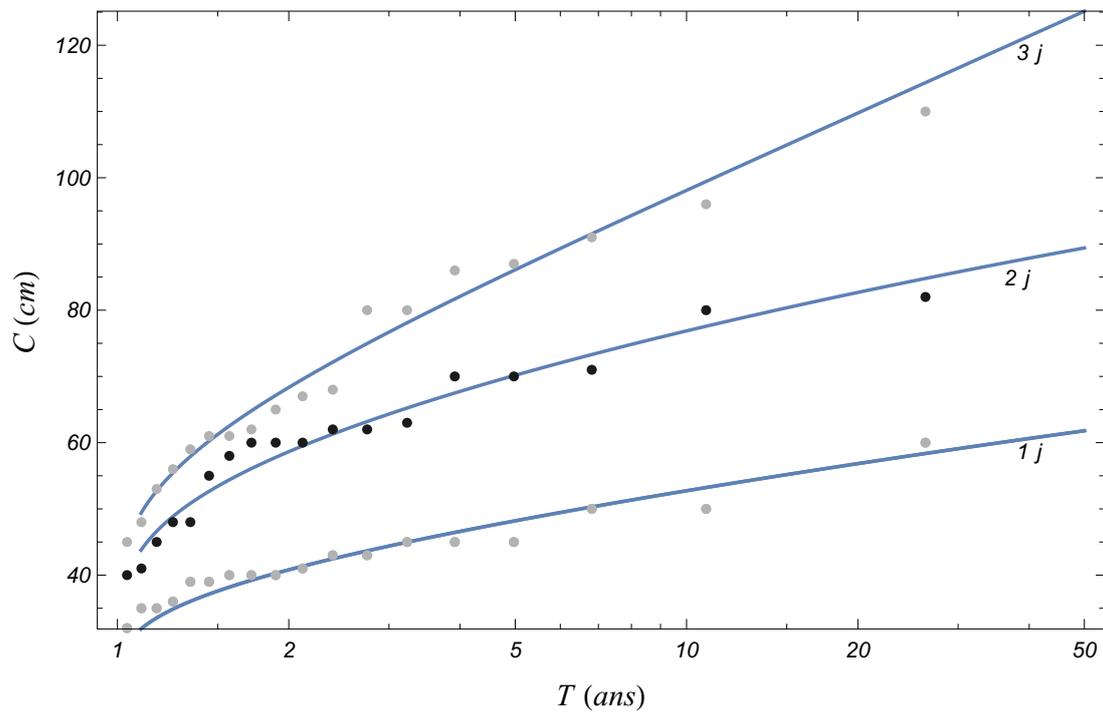


Figure 1.5 : variation de la chute de neige de durée 1–3 jours en fonction de la période de retour sur et Châtel. Points : valeurs mesurées affectées d’une période de retour empirique ; courbes : loi de Weibull ajustée sur les données.

1.3.2 Analyse des chutes de pluie

La chronique des pluies est montrée par la figure 1.6. La plus forte précipitation date du 26 novembre 1983 (108,6 mm), puis la seconde est le 21 décembre 1991 (101,9 mm), et enfin le 26 septembre 1987 (93 mm); les deux premières sont vraisemblablement tombées sous forme de neige.

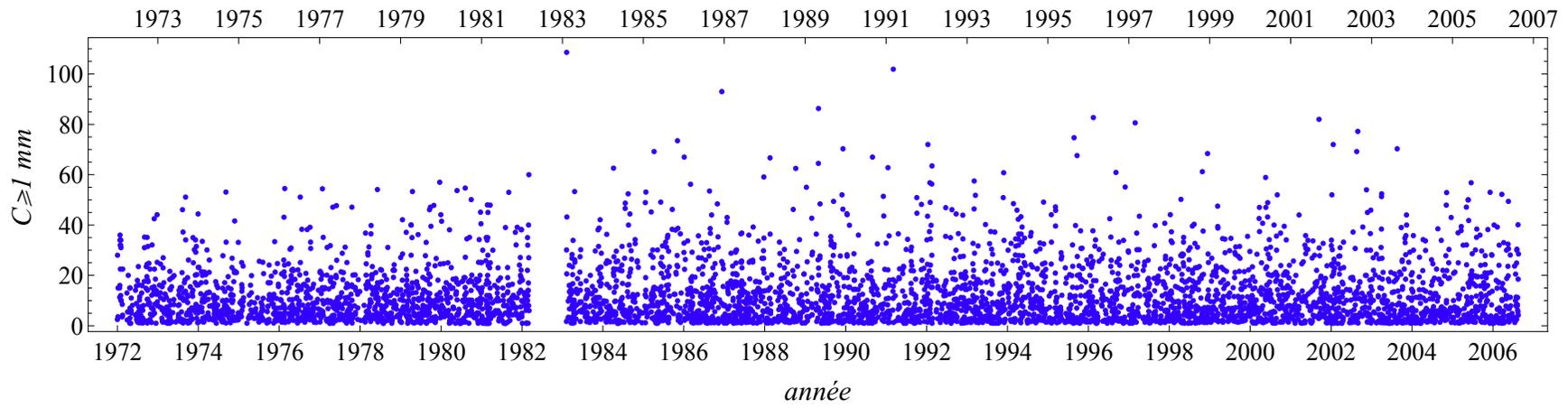


Figure 1.6 : distribution des chutes de pluie sur Châtel depuis novembre 1972.

On reporte sur la figure 1.7 le résultat de l'ajustement d'une loi de type (1.1) sur les données. Outre les paramètres de chaque loi, le tableau 1.4 fournit les intervalles d'incertitude dans l'estimation de ces paramètres (intervalle de confiance à 95 %). Il y a assez peu de différences dans la valeur des paramètres. Compte tenu de la faible différence entre la loi de Fréchet et la loi de Gumbel, on peut considérer que la loi de Gumbel reste un bon candidat pour décrire le comportement des précipitations journalières. On note sur la figure 1.7 très peu d'écart entre les courbes de Fréchet et de Gumbel pour le domaine d'observations (période de retour empirique inférieure à 50 ans). La différence principale entre les deux courbes ne situe pas là, mais plutôt dans leur domaine d'incertitude : relativement restreint pour la loi de Gumbel et très large pour la loi de Fréchet.

Tableau 1.4 : estimation par inférence bayésienne des coefficients ξ , μ , et σ pour la loi des valeurs extrêmes (LVE), la loi de Gumbel pour des chutes de pluie journalières. On a reporté le facteur de Bayes B pour chacun des modèles et les quantiles (en mm) pour les périodes de retour décennale, centennale, et tri-centennale. On a aussi indiqué entre parenthèses l'intervalle de confiance à 95 % pour ξ , μ , et σ et les intervalles de variations pour les quantiles.

	LVE	Gumbel
μ	56,55 ($\pm 5,46$)	56,56 ($\pm 5,14$)
σ	13,53 ($\pm 2,99$)	13,24 ($\pm 1,62$)
ξ	0,03 ($\pm 0,0140$)	0
B	38 %	62 %
$C(T = 10)$	88 (70–113)	86 (75–98)
$C(T = 100)$	123 (82–212)	117 (98–137)
$C(T = 300)$	140 (86–283)	132 (110–155)

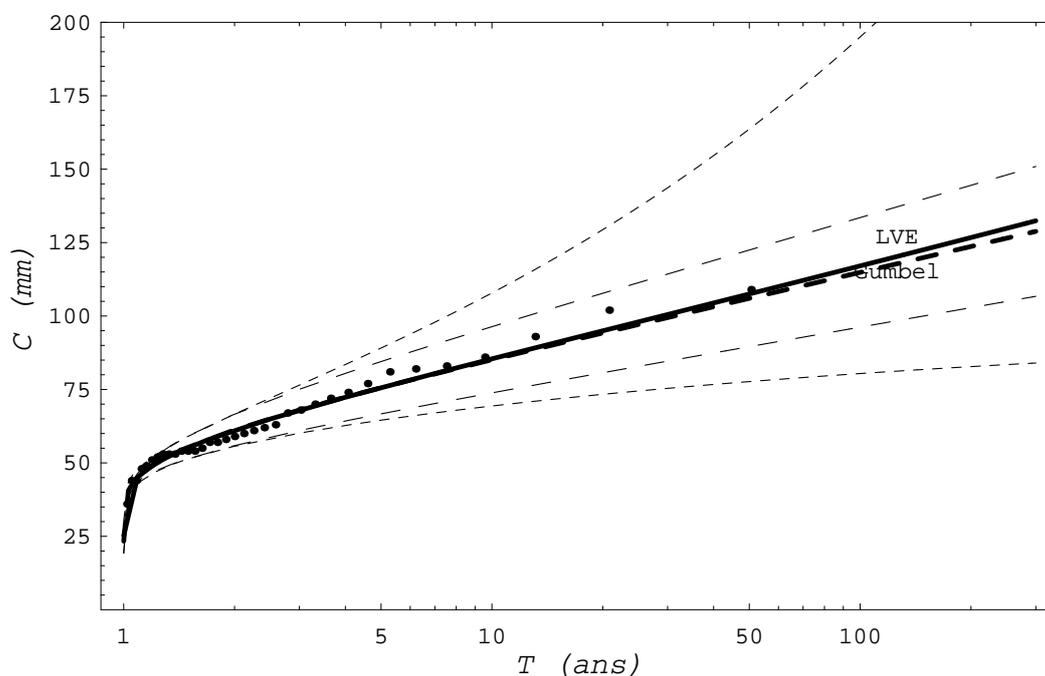


Figure 1.7 : variation de la chute de pluie journalière sur Châtel en fonction de la période de retour. Points : valeurs mesurées affectées d'une période de retour empirique. Trait gras continu : loi de Fréchet. Trait gras discontinu : loi de Gumbel. Trait à tiret fin : intervalles d'incertitude à 95 % pour la loi de Fréchet. Trait à tiret long : intervalles d'incertitude à 95 % pour la loi de Gumbel.

Nous fournissons ici les principales conclusions utiles à l'étude. Le tableau 1.5 recense

l'ensemble des chutes de pluie importantes (cumul de plus de 200 mm) recensées depuis novembre 1972. Il y a un épisode pluvieux important (avec un cumul de plus de 200 mm) en moyenne une fois tous les deux à trois ans et la durée des précipitations peut largement dépasser les deux semaines. Certaines années, comme en 1992, plusieurs cumuls de pluie importants se sont produits. La plupart des épisodes remarquables interviennent durant la saison hivernale, donc vraisemblablement sous forme de neige.

Tableau 1.5 : liste des cumuls de pluie C (en mm) sur Châtel depuis novembre 1972, dont la valeur a excédé 200 mm. La période de retour a été estimée à l'aide d'un modèle de renouvellement ajusté sur les données de pluie.

date	durée (j)	C (mm)	T (ans)
23 novembre 1996	10	201	3
24 novembre 1983	5	205	4
2 juin 1990	12	207	4
12 janvier 1984	13	208	4
26 mai 1992	18	212	4
28 février 2006	12	221	5
11 janvier 2004	10	223	5
16 octobre 2002	10	226	6
29 novembre 1976	12	227	6
1 novembre 2002	14	232	7
10 février 1990	7	239	8
15 mars 1988	13	251	10
20 janvier 1995	11	274	18
10 novembre 1992	13	281	21
4 décembre 1981	22	338	77

La figure 1.8 montre les cumuls mensuels mesurés sur Châtel; la figure 1.9 montre les moyennes des cumuls mensuels de pluie. Le cumul mensuel de précipitations (moyenne sur 35 ans) est de 139 mm et varie dans une fourchette allant de 110 à 160 mm entre la période sèche (avril) à la période humide (décembre ou juillet).

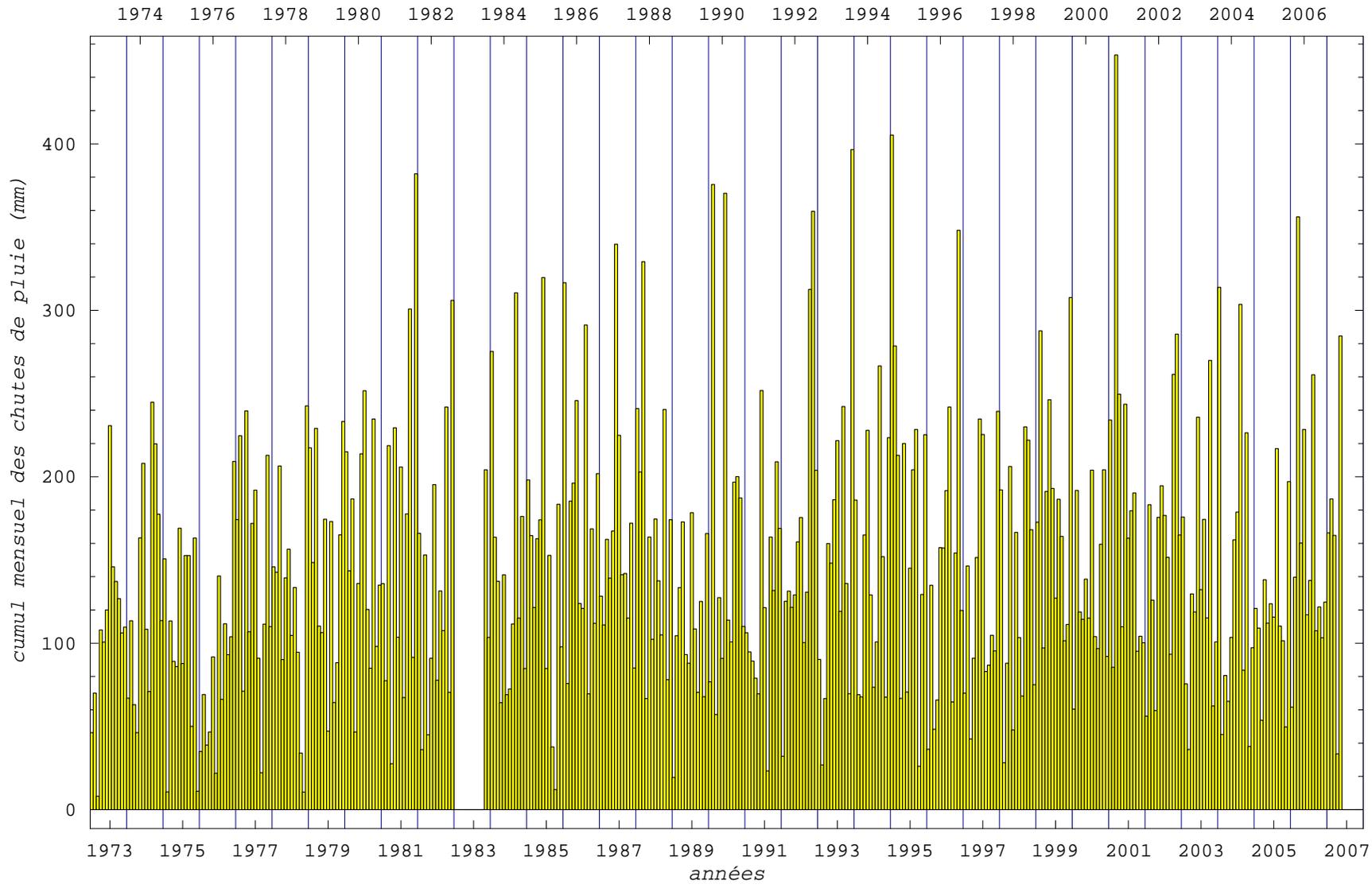


Figure 1.8 : variation dans le temps des cumuls mensuels de précipitations sur Châtel.

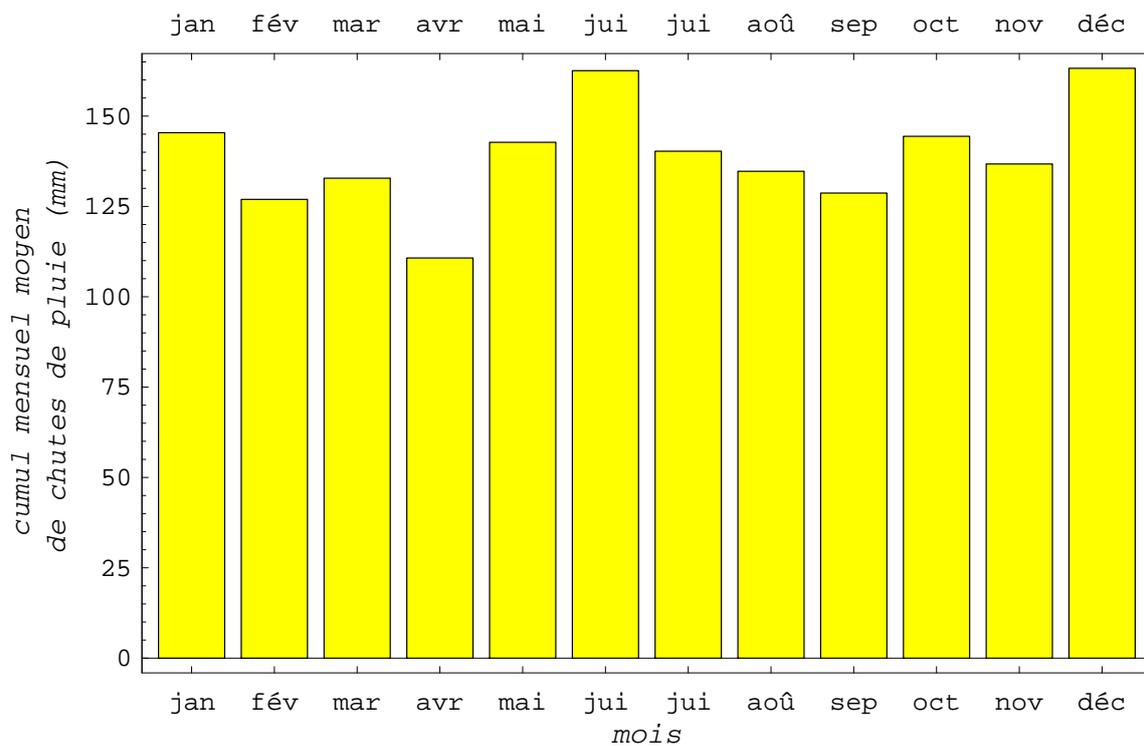


Figure 1.9 : moyenne des cumuls mensuels de pluie pour chaque mois de l'année sur Châtel.

Nous avons commencé l'étude statistique en ajustant un modèle relativement simple connu sous le nom de *modèle de renouvellement*. La figure 1.10 reporte les valeurs mesurées et classées en fréquence ainsi que les courbes calées (loi exponentielle du modèle de renouvellement) sur ces mesures pour des durées allant de 1 à 6 jours pour Châtel. On note que pour les précipitations ordinaires ($T < 3 - 5$ ans), le comportement est exponentiel, mais pour les chutes de pluie plus rares ($T > 5$ ans), on aurait un comportement qui se démarquerait nettement (précipitations supérieures à la tendance moyenne calée sur les précipitations ordinaires), excepté pour les épisodes de pluie sur 6 jours et plus.

Dans un second temps, nous avons poussé l'analyse en ajustant des lois de valeurs extrêmes (Fréchet, Gumbel, Weibull) données par l'équation (1.1). L'ajustement s'est fait à l'aide d'une méthode appelée inférence bayésienne. Les courbes ajustées sur les maxima annuels de précipitations sont reportées sur la figure 1.11. Le résultat de l'analyse est donné au tableau 1.6 pour la station de Châtel. On note sur la figure 1.11 que les chutes de pluie sur 5 ou 6 jours sont de type Weibull ($\xi < 0$) et se comportent donc très différemment des précipitations sur des périodes courtes de 1 à 4, qui ont un comportement de type Fréchet ($\xi > 0$); on note par ailleurs que les courbes une fois extrapolées se croisent, ce qui évidemment n'est pas possible et traduit donc les limites de l'extrapolation vers les quantiles rares.

Comme le paramètre ξ est faible, on peut considérer que la loi de Gumbel offre une description correcte au moins pour les périodes de retour pas trop grandes ($T < 50$ ans). On cherche donc maintenant à caler une loi de type Gumbel pour déterminer l'influence de la durée sur les paramètres

$$P(T, d) = \mu(d) - \sigma(d) \ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right), \quad (1.2)$$

avec d la durée de la précipitation (en j), P le cumul de précipitations sur cette durée (en mm), T la période de retour associée (en années), μ le paramètre de position (en mm), et σ le gradex.

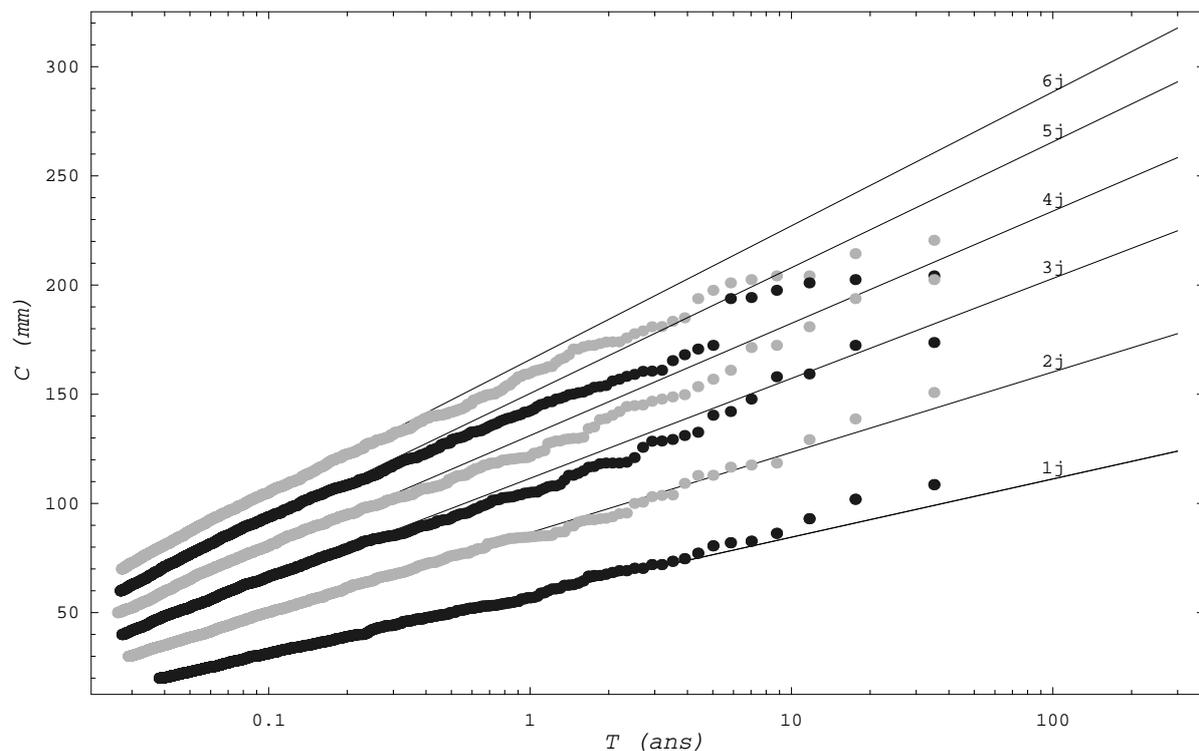


Figure 1.10 : variation de la chute de pluie de durée 1–6 jours en fonction de la période de retour sur Châtel. Points : valeurs mesurées affectées d’une période de retour empirique ; courbes : loi exponentielle (modèle de renouvellement) ajustée sur les données.

Tableau 1.6 : estimation par inférence bayésienne des coefficients ξ , μ , et σ pour la loi des valeurs extrêmes (LVE) pour des chutes de pluie de 1 à 6 jours sur Châtel. On a reporté les quantiles (en mm) pour les périodes de retour décennale, trentennale, et centennale.

	1 j	2 j	3 j	4 j	5 j	6 j
μ	55,4	78,5	95,9	110,0	122,0	133,0
σ	14,2	17,8	21,4	21,8	25,3	27,4
ξ	0,006	0,026	0,012	0,046	-0,086	-0,078
$C(T = 10)$	88	120	145	161	174	189
$C(T = 30)$	104	142	170	189	197	214
$C(T = 100)$	122	166	197	221	218	239

Ces deux derniers paramètres sont fonctions de la durée d ; une loi empirique de type Montana parvient en général à décrire cette dépendance de façon correcte

$$\mu(d) = ad^b \text{ et } \sigma(d) = cd^b. \tag{1.3}$$

On trouve ici $b = 0,45$, $a = 58,6$, et $c = 11,4$.

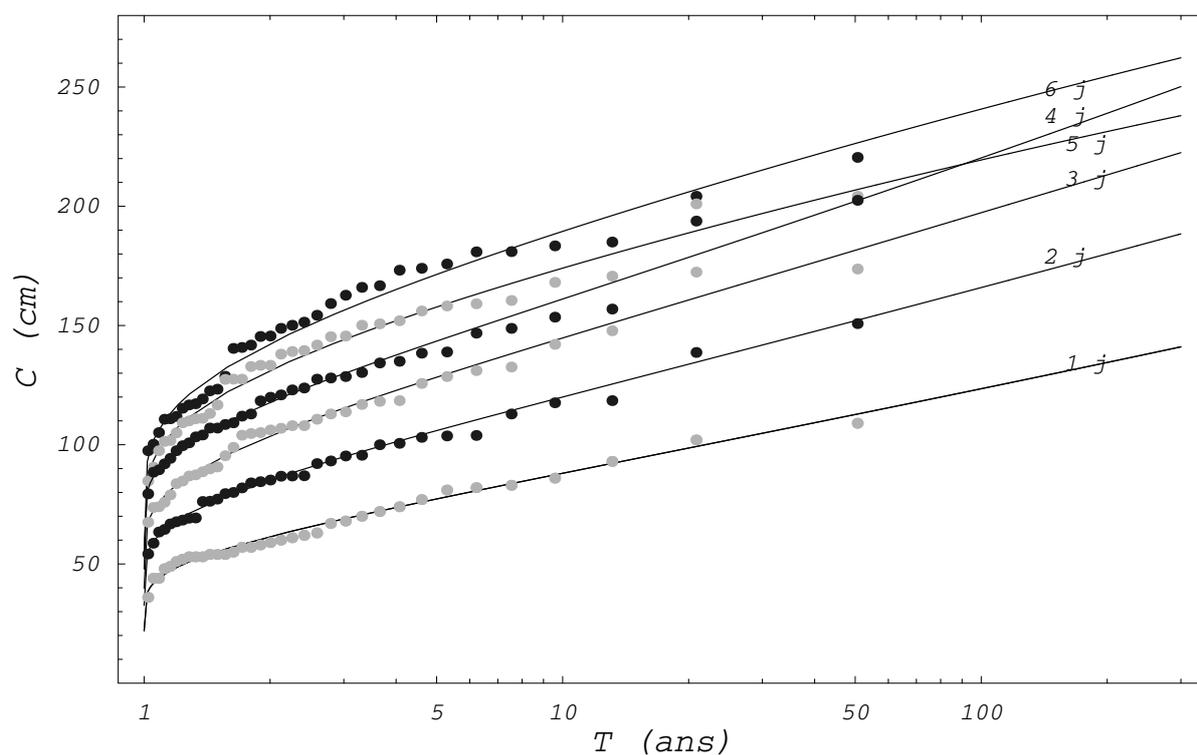


Figure 1.11 : variation de la chute de pluie de durée 1–6 jours en fonction de la période de retour sur Châtel. Points : valeurs mesurées (maxima annuels) affectées d'une période de retour empirique ; courbes : loi de valeurs extrêmes (théorie des valeurs extrêmes) ajustée sur les données.

1.3.3 Étude des précipitations sur quelques heures

Comme nous n'avons pas de pluviographe sur le site étudié, il faut se servir des résultats précédents pour estimer le comportement des pluies aux courts pas de temps. En se servant de l'équation (1.3) et en l'extrapolant à des durées de quelques heures, on obtient les gradex de pluie récapitulés au tableau 1.7. Le poste de Châtel se comporterait comme celui de Chamonix en termes de b , quoique les gradex journaliers soient assez similaires à ceux des postes voisins du Chablais. Les tableaux 1.8 et 1.9 fournissent les estimations des pluies pour des durées de $d = 1$ à $d = 24$ h obtenues par la méthode de Montana pour les périodes de retour $T = 10$ ans et $T = 100$ ans ; on fournit les valeurs obtenues sur d'autres postes. On note que pour $d \geq 12$ h, les pluies prennent des valeurs importantes sur Châtel, qui se situent vraisemblablement parmi les maxima de la région.

Tableau 1.7 : valeur du gradex $\sigma(d)$ (en mm) pour des durées d'une à quelques heures. Paramètre de Montana b . Attention les durées sont en heures.

	$d = 1$	$d = 2$	$d = 3$	$d = 6$	$d = 12$	$d = 24$	b
Châtel	3,7	4,8	5,5	7,0	8,9	11,4	0,45
Abondance	4,8	5,8	6,5	7,8	9,2	11,3	0,28
Vacheresse	6,7	7,6	8,5	9,8	11,6	13,6	0,21
Saint-Paul-en-Chablais	4,5	5,5	6,2	7,5	9,2	11,6	0,29
Chamonix	3,2	4,5	5,4	7,4	10,4	14,5	0,48

Tableau 1.8 : estimation des pluies d'une à quelques heures pour $T = 10$ ans. Valeurs en mm.

	$d = 1$	$d = 2$	$d = 3$	$d = 6$	$d = 12$	$d = 24$
Châtel	28	35	41	52	66	84
Abondance	25	32	36	45	57	72
Vacheresse	27	33	38	47	59	71
Saint-Paul-en-Chablais	24	30	34	42	52	67
Chamonix	20	28	33	46	65	92

Tableau 1.9 : estimation des pluies d'une à quelques heures pour $T = 100$ ans. Valeurs en mm.

	$d = 1$	$d = 2$	$d = 3$	$d = 6$	$d = 12$	$d = 24$
Châtel	37	47	54	68	87	111
Abondance	36	45	51	64	78	99
Vacheresse	43	51	58	70	86	103
Saint-Paul-en-Chablais	34	43	49	60	74	94
Chamonix	25	35	42	58	82	116

1.4 Analyse des orages associés à des crues

Le tableau 1.10 donne les pluies journalières mesurées sur le chef-lieu pour chaque journée où une crue importante sur la commune a été observée. Les valeurs journalières ne sont pas remarquables, aucune ne dépassant le quantile associé à la période de retour 10 ans. Toutefois, ces pluies ont été associées à des orages, donc se sont produites sur des durées brèves (de l'ordre de l'heure d'après les témoignages) et il est possible qu'à cause du relief, les pics d'intensité ne soient pas mesurés sur le chef-lieu durant de tels orages. Rappelons pour mémoire que la pluie sur une heure est de 28 mm pour $T = 10$ ans et 37 mm pour $T = 100$ ans. Les deux crues les plus dommageables (1992 et 2003) ont toutes deux été associées aux orages les plus intenses, dont la période de retour est vraisemblablement grande, c'est-à-dire quelques dizaines d'années (toutefois, ne connaissant pas précisément la durée des orages et n'ayant pas de mesures de pluviographe sur le secteur, on ne peut guère avancer de période de retour de façon précise).

Tableau 1.10 : pluie journalière associée à chaque crue (mesurée à Châtel). Valeurs en mm.

date	pluie journalière
20 juillet 1992	50,9
18 juillet 1999	18,8
5 juin 2000	31,3
2 juin 2003	69,2
5 juin 2003	12,7
16 juillet 2007	25,5

L'examen du tableau 1.5 et de la chronique des pluies (voir figure 1.8) montre en revanche que les périodes humides n'ont pas été associées à des crues sur Châtel.

La figure 1.12 montre les images satellitaires (télévision suisse allemande) prises juste avant les dernières crues (2 et 5 juin 2003 ; 17 juillet 2004). **Les crues sont bien dues à des orages violents survenant par temps chaud, accompagnés de pluie intense sur de courtes durées et qui ne sont pas associés à des systèmes dépressionnaires organisés et prolongés.** Le site de Châtel semble être un lieu de passage favorable aux cellules orageuses actives qui peuvent rester bloqués là quelques dizaines de minutes (effet des Dents du Midi?).

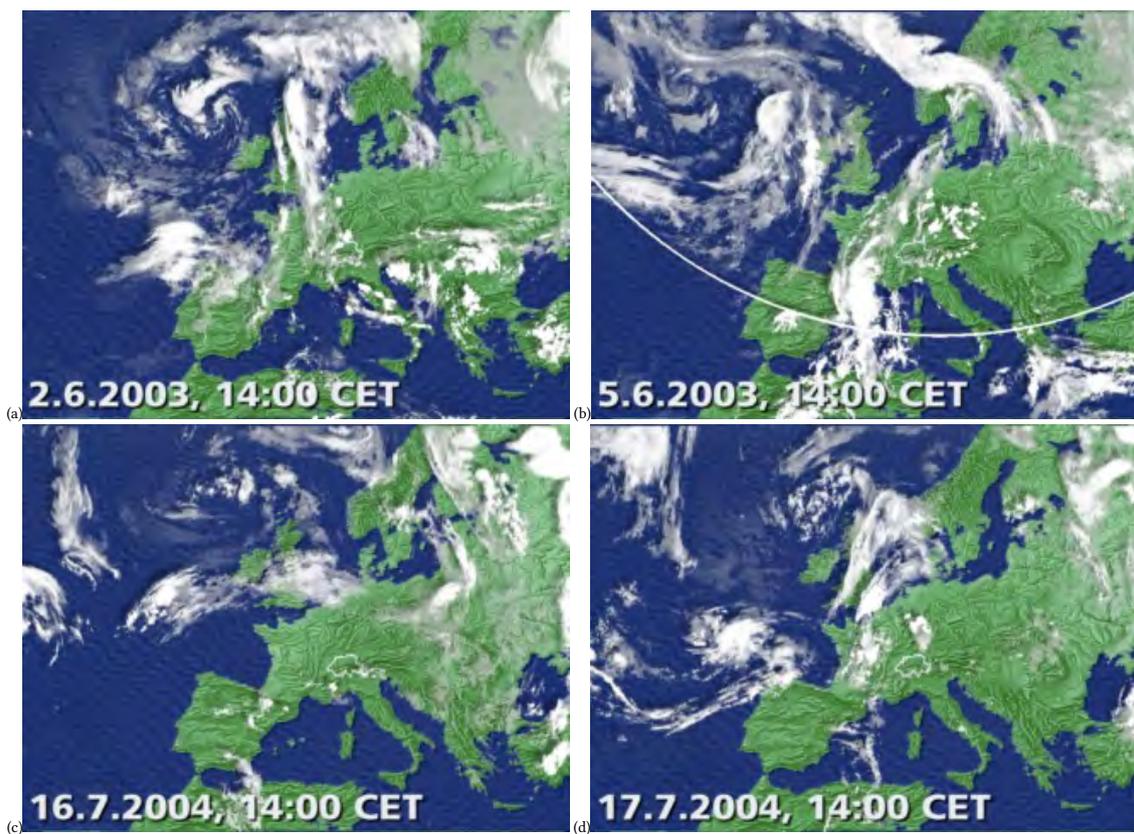


Figure 1.12 : images satellitaires de l'Europe. (a) et (b) crues du 2 et 5 juin 2003 ; (c) et (d) crue du 17 juillet 2004. Source : Schweizer Fernsehen 1.

1.5 Épaisseur de neige au sol

Les valeurs moyennes (moyennes mensuelles) de l'épaisseur de neige au sol sont reportées sur la figure 1.4. On notera que l'épaisseur du manteau neigeux est importante, ce qui est le cas pour les zones suffisamment hautes en Haute-Savoie.

La variation de la hauteur de neige au sol est reportée en fonction de la période de retour sur la figure 1.13. On notera les différences d'épaisseur du manteau neigeux entre le modèle de Gumbel et de Weibull aux grandes périodes de retour. Les paramètres de la loi de valeurs extrêmes (équation 1.1) calée sur les données sont reportés dans le tableau 1.11.

On notera l'incertitude (chiffres entre parenthèses) considérable associée à la détermination de $H(T)$ compte tenu des séries de données courtes. On prendra garde également qu'il s'agit de valeurs journalières maximales, c'est-à-dire des maxima observés sur une journée (les valeurs moyennées sur plusieurs jours sont plus faibles à cause du tassement de la neige).

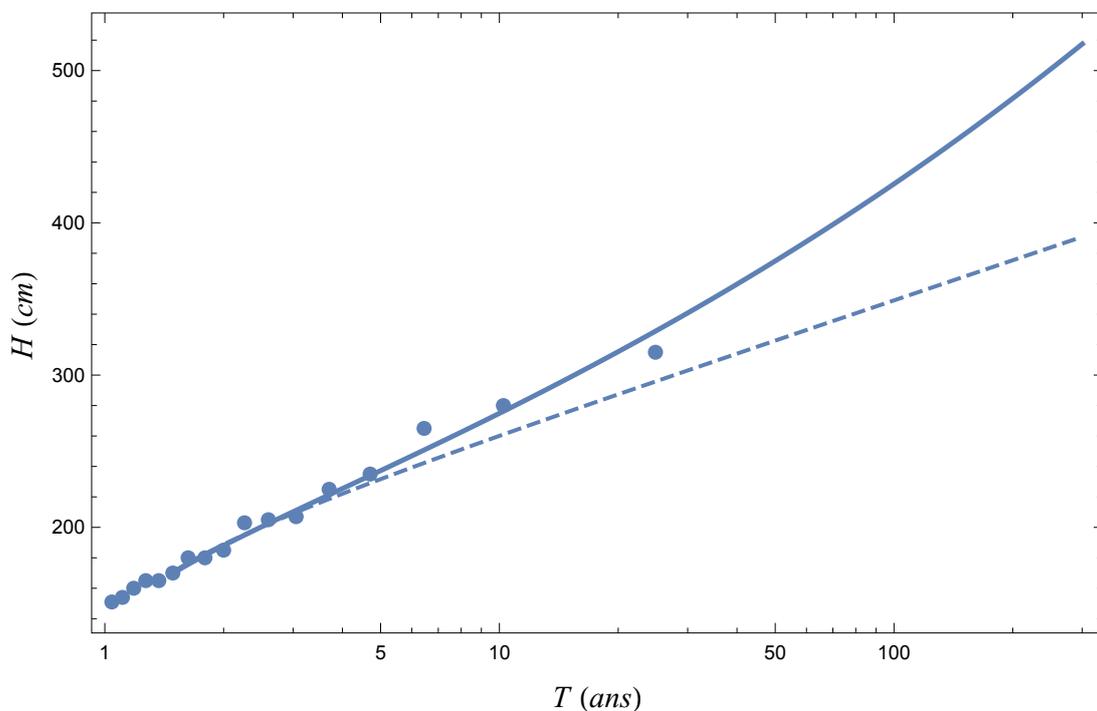


Figure 1.13 : variation de l'épaisseur maximale de neige au sol (sur une journée) en fonction de la période de retour à Châtel.

Tableau 1.11 : estimation par inférence bayésienne des coefficients ξ , μ , et σ pour la loi des valeurs extrêmes (LVE) et la loi de Gumbel pour les maxima annuels de l'épaisseur journalière du manteau neigeux sur Châtel. On a reporté le facteur de Bayes B et les quantiles (en cm) pour les périodes de retour décennale, trentennale, et centennale. On a aussi indiqué entre parenthèses l'intervalle de confiance à 95% pour ξ , μ , et σ et les intervalles de variations pour les quantiles.

	LVE	Gumbel
μ	173,9 ($\pm 50,6$)	174,86 ($\pm 53,8$)
σ	37,52 ($\pm 24,3$)	37,87 ($\pm 4,90$)
ξ	0,15 ($\pm 0,0380$)	0
B	45 %	55 %
$C(T = 10)$	275 (209–393)	260 (224–296)
$C(T = 30)$	341 (226–638)	303 (256–350)
$C(T = 100)$	426 (240–1131)	349 (291–408)

1.6 Synthèse

Pour les calculs d'avalanche, **nous nous fondons sur les cumuls de neige sur 3 jours pour évaluer le volume de neige mobilisable par l'avalanche**. En se fondant sur les valeurs enregistrées sur Châtel pour les chutes de neige (c'est le poste qui constitue la plus longue série), on arrive aux estimations suivantes des cumuls de neige sur 3 jours C et des hauteurs du manteau neigeux H (mesurées selon la verticale)

- quantile mesuré pour $T = 30$ ans, $C = 120$ cm (modèle de type Fréchet), $H = 300$ cm (modèle de type Gumbel);
- quantile extrapolé pour $T = 100$ ans, $C = 140$ cm (modèle de type Fréchet), $H = 350$ cm (modèle de type Gumbel).

Ce sont les valeurs utilisées pour les simulations numériques.

Pour les pluies, nous nous servirons des valeurs de cumul en fonction de la durée de précipitations consignées dans les tableaux 1.8 ($T = 30$ ans) à 1.9 ($T = 100$ ans).

Analyse du risque d'avalanche

2.1 Méthodes

L'analyse spatiale vise à donner une image qualitative du fonctionnement avalancheux du site étudié. Elle est principalement fondée sur l'expérience naturaliste et l'observation de terrain. À partir de différents éléments :

- observations recueillies lors de nos visites de terrain ;
- collecte et analyse critique de diverses sources historiques ;
- analyse des profils de terrain et carte des pentes (tirés à partir du fond topographique fourni par le maître d'œuvre),

nous avons cherché à distinguer d'une part les zones de départ élémentaires (les panneaux de départ) des versants menaçant le projet et, d'autre part, les trajectoires et les zones d'arrêt qui leur sont associées.

2.2 Données

L'étude a pris en considération les documents suivants :

- les données de l'enquête permanente sur les avalanches (EPA) ;
- la carte de localisation des phénomènes d'avalanches (CLPA),

et s'est appuyée sur :

- le fond topographique, issu d'un levé LiDAR récent, fourni par le maître d'œuvre sur le périmètre de la zone d'étude ;
- le fond cartographique Scan25 de l'IGN (source geoportail.fr), et la carte nationale 1:10'000 de l'Office fédéral de topographie Swisstopo (source map.geo.admin.ch) ;
- l'orthophotoplan BDOrtho de l'IGN (source geoportail.fr) ;
- la couverture de photographies aériennes : plusieurs missions de l'IGN et l'IFN de 1980 à 2012.

2.3 Éléments historiques

2.3.1 Enquête permanente sur les avalanches

L'EPA est une procédure de suivi des avalanches mise à l'œuvre par l'administration forestière au début du xx^e siècle sur l'ensemble des Alpes françaises. L'agent forestier renseigne l'activité avalancheuse d'un certain nombre de couloirs identifiés ; il consigne pour chaque événement constaté la date d'occurrence (ou à défaut la date d'observation), les altitudes de départ et d'arrêt, le type d'avalanche (selon une typologie qui a souvent changé depuis le début du xx^e siècle), les dégâts éventuels occasionnés, etc. Le secteur étudié figure sur la feuille AD67 de l'atlas de l'EPA (voir figure 2.1).

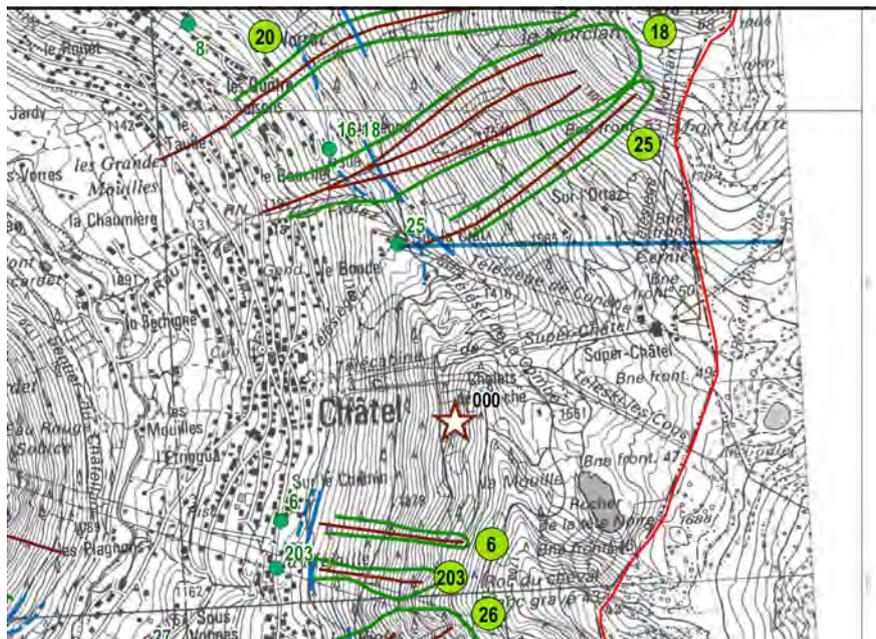


Figure 2.1 : atlas de l'EPA, extrait de la feuille AD67. Échelle 1:25 000. Le projet est reporté en surimpression. © IGN-Paris 2003, © MEDDE-ONF-Irstea 2012.

La face sud-ouest du Morclan est suivie à l'EPA depuis 1923. Trois sites d'observation y figurent, et c'est en particulier le site n° 25 qui concerne notre zone d'étude. Si le site n° 18 affiche près de 190 événements sur 95 ans, l'observation du site n° 25 est plus tardive : elle débute en 1973 et à ce jour seulement 8 événements ont été consignés. L'essentiel de l'activité avalancheuse décrite sur ces sites correspond à un contexte météorologique de redoux ou de pluie. Des événements constatés sur le site n° 25 on retient les caractères suivants :

- ce sont le plus souvent des avalanches coulantes intéressant toute la couche de neige ;
- les altitudes de départ sont principalement situées entre 1800 et 1850 m ;
- l'avalanche du 17 février 1978 atteint la cote d'arrêt 1250 m ;

La consultation des carnets forestiers nous informe sur l'avalanche du 7 avril 1988. L'agent porte en remarque : « 2 coulées de neige sont descendues à 12h30 et à 13h30. Arrivées contre 1 chalet au lieu-dit "Les Granges de sur le Crêt". Heure notée : 12h30 et 13h30. » Les avis d'avalanche du 5 mars 1977 et du 23 mars 1995 font état de dégâts mineurs à la forêt.

Au cours de ces quatre décennies d'enquête EPA, aucun dommage n'a été signalé sur le télésiège de Conche, mis en service en 1981.

2.3.2 Carte de localisation des phénomènes d'avalanches

La carte de localisation des phénomènes d'avalanches (CLPA) est un document informatif mis en œuvre au début des années 1970, qui dresse un inventaire des avalanches connues sur une grande partie des Alpes et des Pyrénées. Elle comporte deux types d'informations :

- des avalanches reconnues par enquête sur le terrain (figurées en magenta sur la carte) ;
- des avalanches reconnues par photo-interprétation (figurées en orange sur la carte).

Le secteur étudié figure sur la feuille AD67 de l'atlas de la CLPA. Cette version de la CLPA dressée en 2006 est une réédition de la carte Châtel-Morzine réalisée en 1994, elle-même réédition de la carte Morzine-Avoriaz parue en 1971. La figure 2.2 représente un extrait de la carte de 1971 et un extrait à jour de la feuille AD67.

Avalanches reconnues par photo-interprétation

Le travail de photo-interprétation figurant sur la carte est hérité de la première version de la CLPA. Le fond topographique à l'échelle 1:20 000 utilisé en 1971 souffrait de nombreuses imprécisions (voir figure 2.2) ; malgré un transfert des tracés réalisé par analogie lors de l'enquête de 2006 sur le fond topographique moderne, il peut subsister des contours dessinés localement en discordance avec la topographie.

Trois tracés d'avalanches occupent la face sud-ouest du Morclan. Compte tenu de la topographie très monotone du versant, on s'interroge sur les raisons qui ont conduit le photo-interprète à proposer ce découpage, probablement s'appuie-t-il sur les indices de passage d'avalanches à travers les bosquets de forêt situés dans le tiers inférieur de la pente. Si cette vision des phénomènes a le mérite d'identifier les systèmes majeurs du site, nous estimons qu'elle manque d'exhaustivité, et que de multiples trajectoires d'avalanches sortent des limites de ces tracés. Une des avalanches identifiées touche le télésiège. L'extrémité de cette avalanche est prolongée dans le ruisseau de la Fiolaz par une extension présumée (hachures-tirets).

Selon la photo-interprétation de la CLPA, la gare inférieure de la remontée mécanique est concernée par un dépôt d'avalanche provenant du Morclan, et le début de la ligne sur une distance d'environ 150 m.

Avalanches reconnues par recueil de témoignages

Les avalanches n^{os} 2 et 3 sont identifiées dès la version initiale de la CLPA en 1971. Le projet de télésiège est touché à son extrémité inférieure par l'avalanche n^o 3. La version actuelle de la carte reprend le tracé initial de l'avalanche en lui adjoignant une extension sur sa rive droite, mais la délimitation de la zone d'arrêt principale en rive gauche semble héritée de la version de 1971 ; il nous est difficile d'apprécier la précision du tracé dans cette zone d'arrêt de l'avalanche, notamment de savoir si le dépôt d'avalanche a été observé sur la rive gauche du ruisseau de la Fiolaz, et dans les dimensions indiquées sur la carte.

La fiche signalétique de cette avalanche n'apporte aucune information dans les versions de 1971 et 1994. La fiche dressée en 2007 nous renseigne sur deux événements :

- l'un survenu le 7 avril 1988, pour lequel l'enquêteur rapporte le témoignage de l'agent forestier : « L'avalanche s'est arrêtée sur un chemin fermé aux skieurs (filets) mais emprunté par les dameuses et dans un ruisseau près d'un télésiège. Elle est passé contre un chalet situé sous la forêt. » ;
- l'autre survenu le 27 février 1995, avec un témoignage similaire de l'agent forestier.

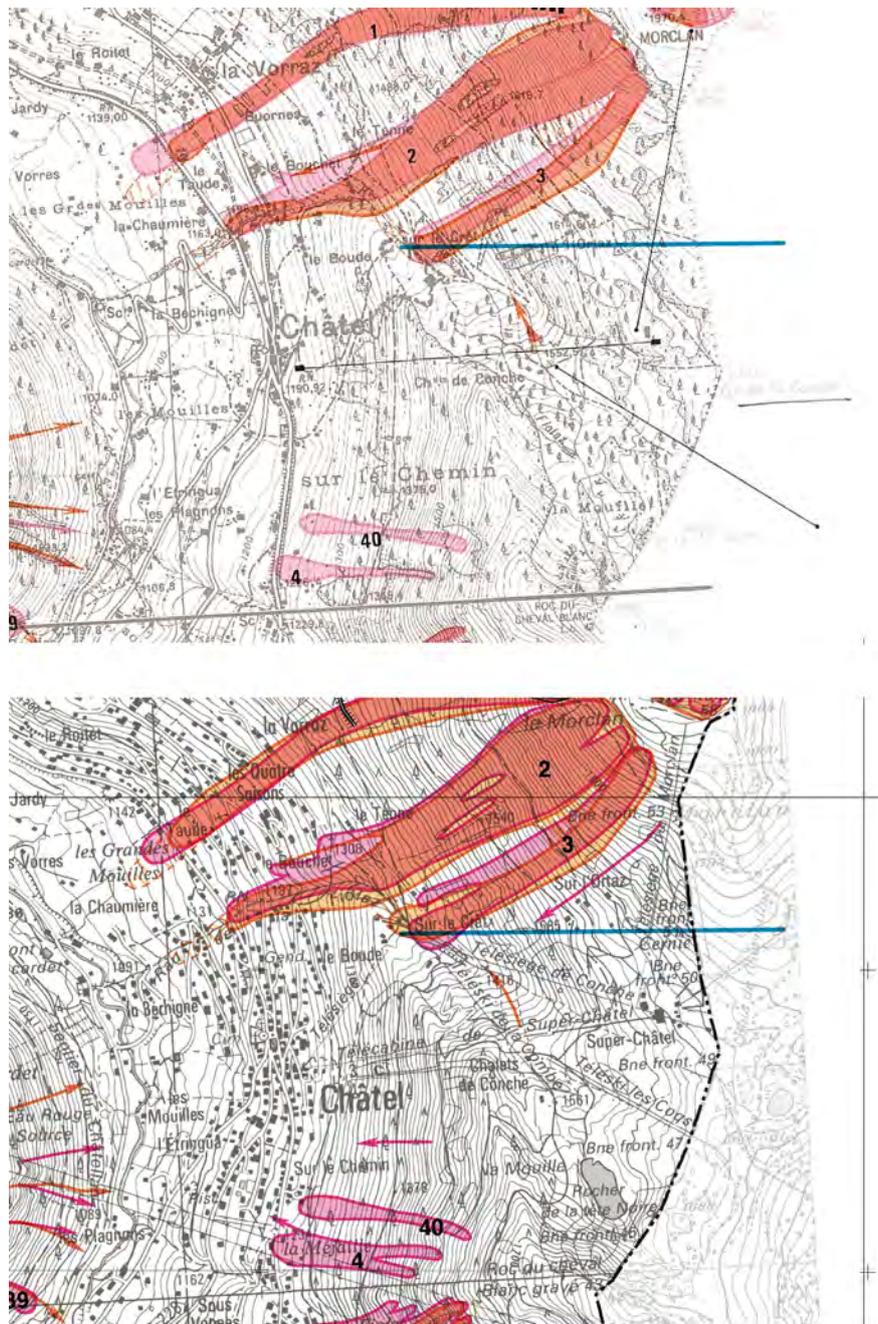


Figure 2.2 : haut : extrait de la CLPA Morzine-Avoriaz, édition 1971 ; bas : atlas de la CLPA, extrait de la feuille AD67, édition 2006. Échelle 1:25 000. Le projet est reporté en surimpression. © IGN-Paris 2003, © MEDD-ONF-Cemagref 2006.

La section suivante revient sur ces événements documentés.

À l'est de l'avalanche n° 3, une avalanche localisée (flèche magenta) figure dans la version récente de la carte. Elle n'atteint pas l'axe de la ligne du projet. La trajectoire du phénomène apparaît en discordance avec la topographie dans sa partie haute ; il n'est pas invraisemblable qu'un dépôt d'avalanche ait été constaté à l'ouest des chalets de *Sur l'Ortaz*, mais une erreur de report cartographique a peut-être été commise quant à la localisation de la zone de départ de la coulée.

En somme, si l'on s'en tient à la lecture de la CLPA, le télésiège de Conche est lo-

calement menacé par les avalanches. C'est le bas de la ligne qui est touché sur une distance d'environ 150 m. La gare inférieure est menacée par les avalanches.

2.3.3 Documents d'archives

Nous disposons de documents d'archives se rapportant au secteur du Morclan, dont certains décrivent des événements constatés sur le site CLPA n° 3.

Avalanche n° 3

Une fiche événement rédigée par le technicien RTM décrit l'avalanche survenue le 7 avril 1988. La fiche est accompagnée d'un report cartographique de l'événement et d'un croquis du dépôt de l'avalanche (voir figure 2.3).

Quelques années plus tard, le 27 février 1995, un événement semblable se produit sur les mêmes pentes. Une fiche événement est émise (voir figure 2.4).

Les deux événements présentent des emprises très semblables. On note que **le dépôt de l'avalanche de 1995 a approché la gare inférieure du télésiège de Conche.**

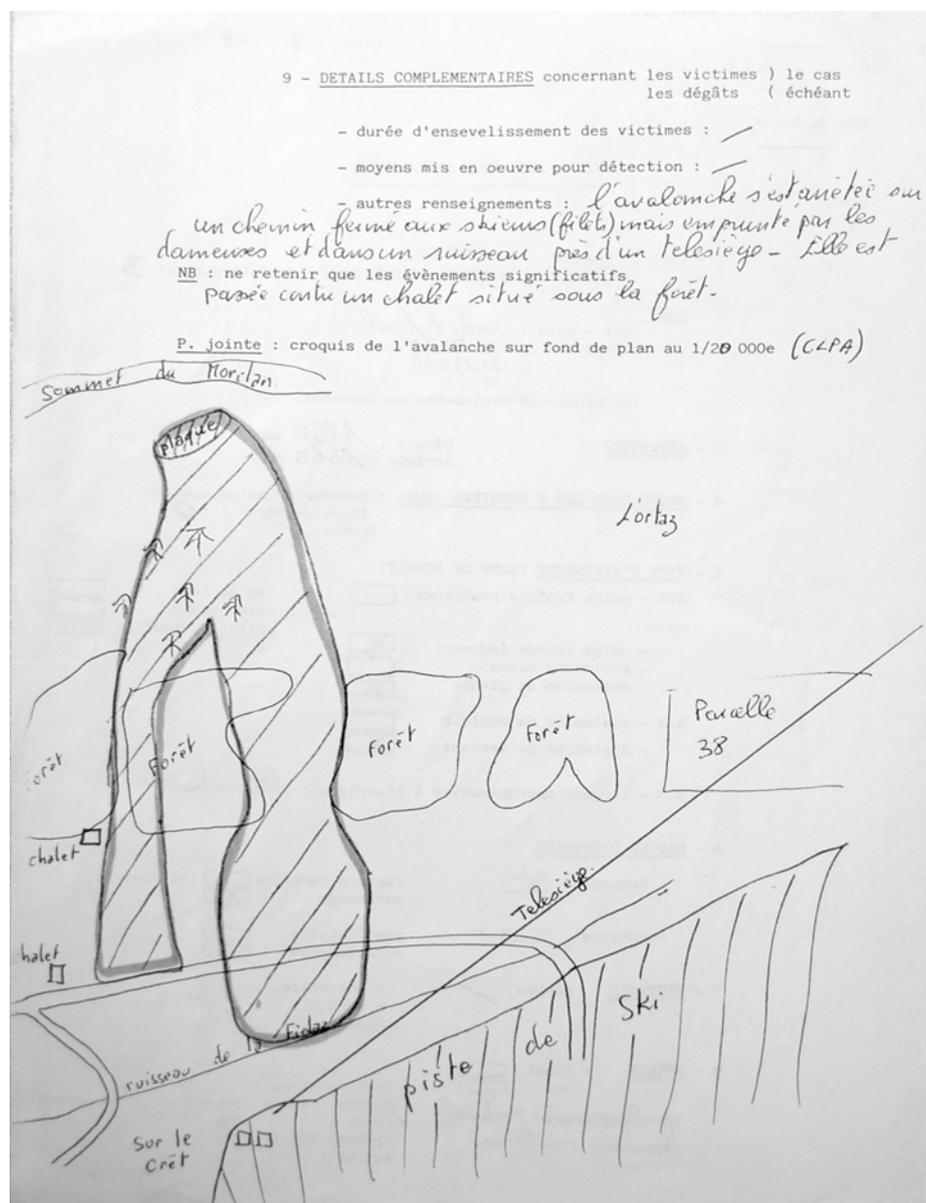


Figure 2.3 : croquis de l'avalanche du 7 avril 1988 joint à la fiche événement RTM.

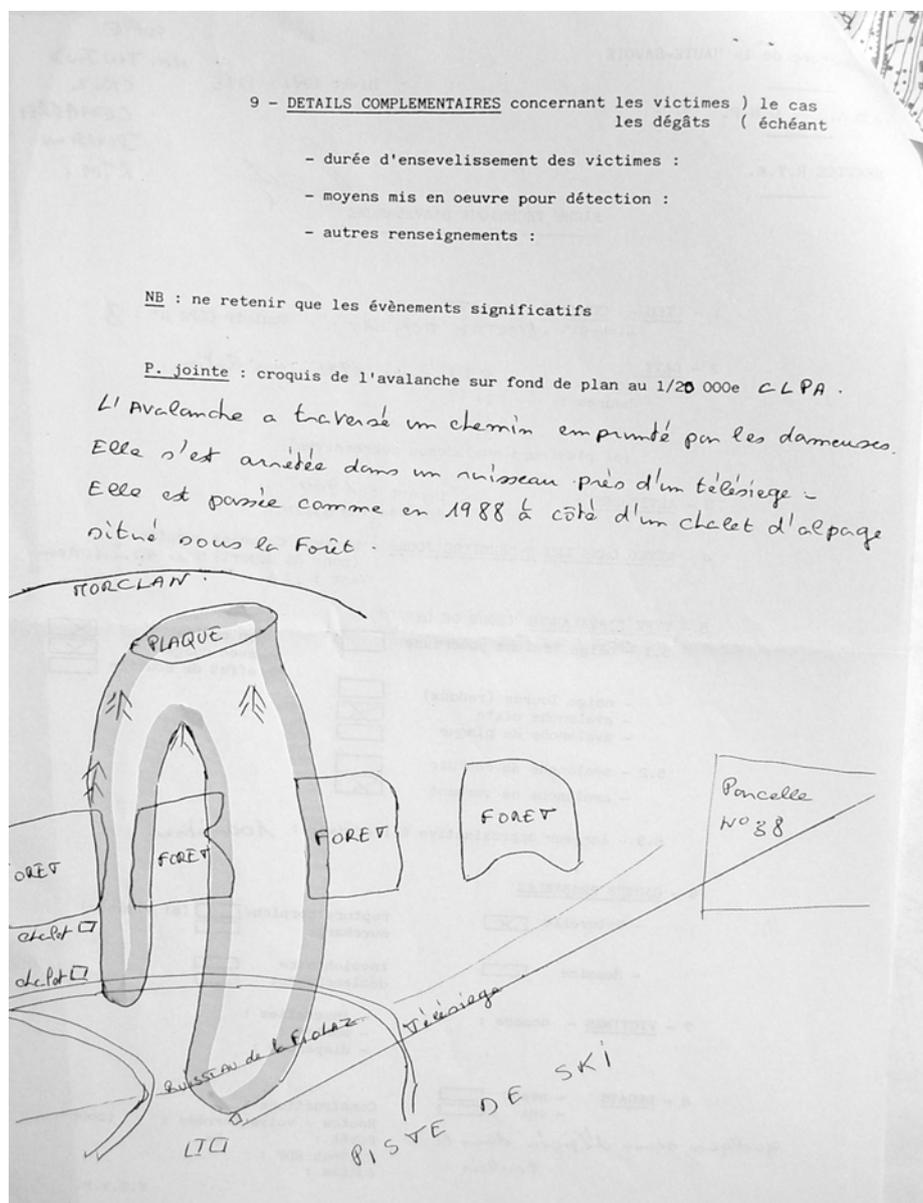


Figure 2.4 : croquis de l'avalanche du 27 février 1995 joint à la fiche événement RTM.

2.4 Analyse spatiale du risque d'avalanche

2.4.1 Principe

Notre analyse spatiale repose sur

- un examen stéréoscopique des couples de photographies aériennes de l'IGN¹ ;
- l'exploitation du levé topographique LiDAR ;
- nos observations de terrain effectuées en 2006 et le 23 août 2018.

↔ La symbolique utilisée pour les cartes est la suivante :

- traits rouges : délimitation des panneaux déclencheurs intéressant le projet ;
- traits oranges épais : singularités du relief, jouant un rôle dans la propagation des flux ;
- flèches noires : trajectoires d'avalanches coulantes caractérisées par un comportement gravitaire ;
- flèches bleues : trajectoires d'avalanches coulantes rapides avec ou non développement d'aérosol, caractérisées par un comportement inertiel.

Nous présentons une synthèse de cette analyse sous la forme d'un schéma de fonctionnement des avalanches (voir figure 2.6). Les commentaires qui accompagnent le schéma se focalisent sur les systèmes qui menacent directement l'appareil.

2.4.2 Morphologie

Le projet de télésiège de Conche est situé sur le versant sud-ouest du Morclan. On distingue schématiquement d'ouest en est :

- la longue face sud-ouest escarpée du Morclan, culminant à 1960 m d'altitude ;
- une combe perchée au-dessus de 1800 m, aux flancs peu inclinés, qui domine les chalets de Sur l'Ortaz ;
- l'arête qui joint le Morclan au plan d'eau du *Goillet*, formant une croupe aux pentes débonnaires.

L'activité avalancheuse principale de notre zone d'étude se situe a priori sur le premier de ces trois compartiments.

Le modelé topographique de la face sud-ouest est d'une régularité remarquable. Les pentes sont escarpées, inclinées à plus de 35° sur une superficie d'au moins 10 ha. On identifie d'imposants panneaux d'accumulation notés p_0 (voir figure 2.5). Ils dominent deux couloirs nettement découpés dans la forêt. À l'est de ce système, on distingue deux panneaux notés p_{01} et p_1 aux caractères morphologiques très semblables aux précédents ; nous opérons ici une distinction

1. plusieurs missions aériennes ont été examinées :

- mission IGN C3328-0021_1980_F3328-3528 du 24 août 1980, clichés 110 et 111 ;
- mission IGN C3528-0011_1988_F3528-3528 du 27 septembre 1988, clichés 68 et 69 ;
- mission IFN CN95000014_1995_IFN74_IRC du 5 août 1995, clichés 1060 et 1061 ;
- mission IGN CP04000702_2004_fd74_c_20000 du 4 juillet 2004, clichés 2160 et 2161 ;
- mission IGN CP12000122_fd74x0052 du 11 août 2012, clichés 5875 et 5876 ;



Figure 2.5 : schéma de fonctionnement des avalanches : morphologie. La ligne en pointillé jaune localise le télésiège. Échelle 1:10 000. Fond topographique CNA, orthophotoplan géoportail © IGN 2018.

entre ces deux groupes car le premier alimente des écoulements qui ne concernent pas le projet, mais il faut garder à l'esprit que ces zones de départ potentiel d'avalanches adjacentes très peu compartimentées entretiennent probablement des liens fonctionnels étroits.

La planéité de la face est perturbée par un léger changement d'orientation qui s'opère progressivement, et qu'on identifie par les singularités s_0 . Celles-ci marquent une ligne de partage efficace des écoulements de neige. Au sud-est de cette ligne et au-dessous de 1700 m, de nouveau quelques convexités peu marquées du terrain s_{11} vont contribuer à diviser les écoulements. Plusieurs zones de départ d'avalanche intermédiaires p_{11} et p_{12} sont identifiées entre 1500 et 1700 m. Comme précédemment, l'absence de cloisonnement entre ces panneaux favorise une activité avalancheuse connexe.

Vers 1550 m, le profil transversal du versant globalement convexe fait place à un talweg, bordé de flancs notés s_{12} , qui jouent un rôle de canalisation des écoulements de neige. Vers 1430 m ce talweg débouche sur un cône de déjection s_{13} proéminent, favorisant l'étalement des flux au passage de la route de *Sur le Crêt*. Le ruisseau de la Fiolaz ferme le bas du versant par une gorge étroite. Le hameau de Sur le Crêt occupe la rive gauche du ruisseau, qu'il commande d'une quinzaine de mètres de dénivelée (singularités s_{14}).

Le second compartiment est constitué d'une combe aux flancs peu inclinés, qui domine les chalets de Sur l'Ortaz. Seul un faible ressaut noté p_2 constitue une zone de départ possible d'avalanche. En contrebas, on identifie un second panneau d'accumulation p_{21} qui peut ali-

menter des coulées sur la prairie de Sur l'Ortiz. Le relief très ouvert et l'inclinaison moindre du terrain (25°) sont un frein à la propagation des écoulements au-dessous de 1600 m. Au-dessous de 1550 m le pré fait place à la forêt : la pente s'accroît subitement (33°), et malgré la fermeture du terrain par une végétation récente, on distingue deux panneaux notés p_{31} qui sont des zones de départ probable d'avalanches. Les couloirs qu'ils dominent portent les traces du passage relativement fréquent d'avalanches.

En allant plus à l'est, le terrain est occupé par le bois de Chermillon. Ce peuplement mature présente quelques pentes raides au sein desquelles cependant une activité avalancheuse nous apparaît peu vraisemblable. Le projet de télésiège franchit l'arête, la gare d'arrivée est située à la lisière est du bois. On note pour mémoire les pentes orientées à l'est, situées au-dessus du bois, qui présentent un ensemble de panneaux d'accumulation notés p_4 .

2.4.3 Phénomènes

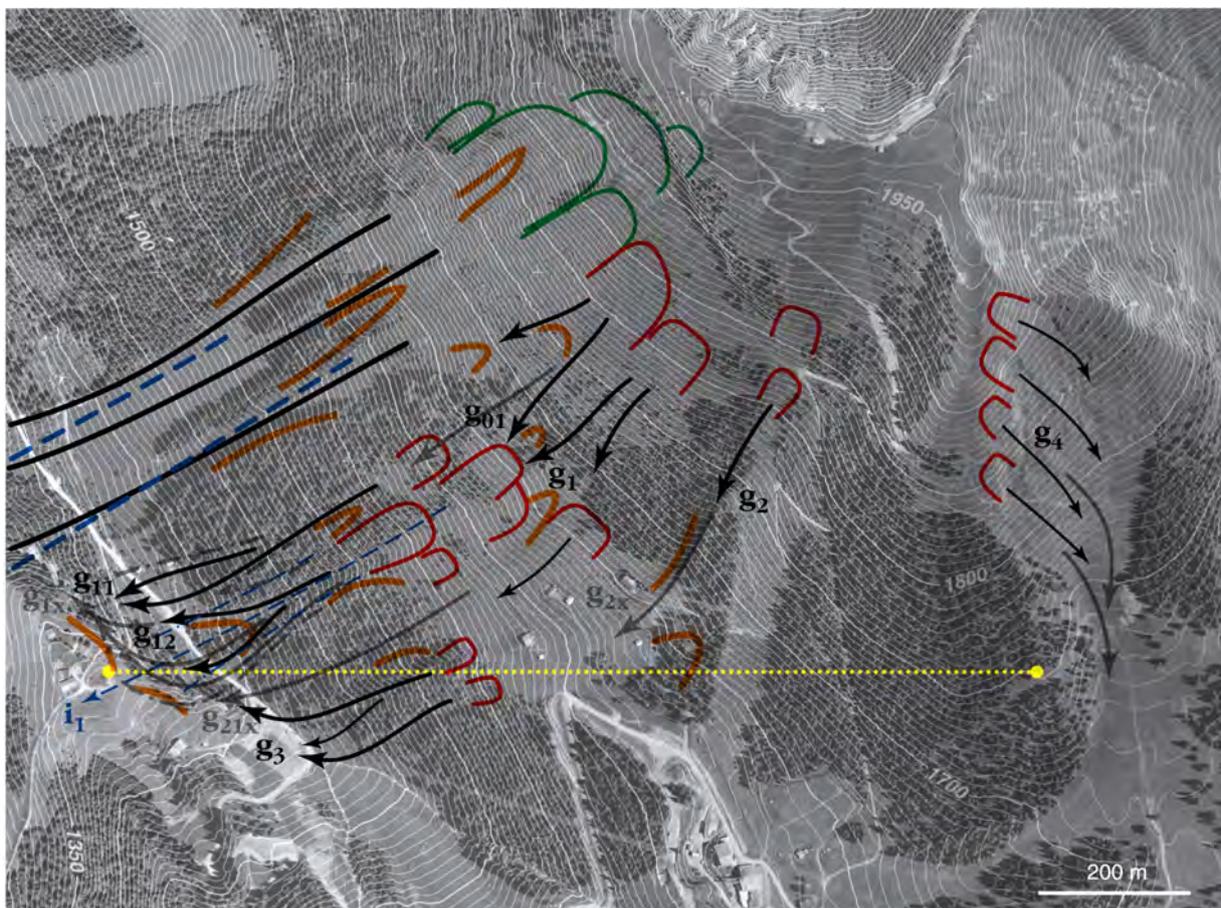


Figure 2.6 : schéma de fonctionnement des avalanches : phénomènes. La ligne en pointillé jaune localise le télésiège. Échelle 1:10 000. Fond topographique CNA, orthophotoplan géoportail © IGN 2018.

Nous reprenons ici le même découpage que précédemment, c'est-à-dire que nous examinons le versant d'ouest en est, en identifiant trois secteurs successifs.

Les panneaux p_0 sont à l'origine d'une activité avalancheuse parfois intense, de nature diverse (avalanches coulantes denses, avalanches coulantes rapides, possibles aérosols). Ces phénomènes ne concernent pas le projet de télésiège, mais en l'absence d'une compartimentation nette entre zones d'accumulations voisines, le panneau noté p_{01} (et dans une moindre

mesure p_1) peut fonctionner simultanément. Les écoulements qui en sont issus se partagent sur la bosse s_0 , une partie des flux d'avalanches suit la trajectoire g_{01} . L'activité avalancheuse associée aux épisodes nivo-météorologiques ordinaires (période de retour $T \sim 5$ ans) se manifeste par des avalanches coulantes dont l'extension est limitée (trajectoires g_{01} , g_1).

En contrebas, le groupe de panneaux p_{11} , p_{12} a un fonctionnement propre, qui correspond là aussi à des avalanches coulantes denses en situation nivométrique standard. Elles suivent les trajectoires notées g_{11} , g_{12} . Les dépôts de neige s'observent sur la piste d'accès au hameau de Sur le Crêt, plus rarement dans le lit du ruisseau de la Fiolaz. La partie des flux de neige qui se trouve déviée à l'est du cône s_{13} croise le tracé du projet sur une centaine de mètres de distance entre 1360 et 1400 m d'altitude.

Lors de conditions de forte instabilité de manteau neigeux, ou à la suite de fortes chutes de neige, il faut considérer que les systèmes étagés adoptent un fonctionnement en cascade. Aux périodes de retour longues ($T \sim 30$ ans) de grandes avalanches peuvent s'y produire. On propose de distinguer deux types d'écoulements pour ces phénomènes de grande période de retour :

- des avalanches en régime gravitaire : de grandes avalanches coulantes peuvent parcourir le versant depuis 1850-1900 m jusqu'à la Fiolaz, suivant les trajectoires g_{1x} (flèches grises). Les dépôts de neige volumineux occupent le lit du ruisseau sur une largeur continue de plus de 200 m en situation critique. L'encaissement du ruisseau peut ne pas suffire à contenir les dépôts, ceux-ci peuvent occuper une partie du replat du hameau. Le projet d'appareil est concerné par ces phénomènes : la gare peut être touchée par des langues terminales d'avalanche débordant en rive gauche du ruisseau. La ligne est concernée par l'avalanche sur une distance d'environ 200 m depuis la gare ;
- des avalanches en régime inertiel : le versant présente des caractéristiques qui permettent le développement d'avalanches coulantes rapides. Une forte couche de neige récente très peu consolidée favorise le développement d'avalanches en aérosol sur ce site. La trajectoire principale adoptée par ces phénomènes est matérialisée par la flèche i_1 . On a sans doute affaire en réalité à un faisceau de trajectoires, dont certaines atypiques, qui peuvent sensiblement s'écarter de cette direction, mais on estime que la trajectoire i_1 correspond aux phénomènes les plus vigoureux. Le projet est située dans l'emprise de ces avalanches : si la capacité de dommage aux structures métalliques est limitée, il faut considérer que des dégâts soient causés aux parties plus fragiles de la gare (local, équipements électriques, véhicules en gare).

L'activité avalancheuse associée au panneau p_{21} , considéré individuellement, est sans doute limitée. Ordinairement ce sont de faibles coulées qui s'épanchent à l'ouest des chalets, mais le volume de neige mobilisable est restreint, il limite la distance d'arrêt des écoulements à une altitude supérieure à 1570 m. Sous des conditions nivo-météorologiques sévères, il faut comme précédemment envisager un fonctionnement en cascade des système du versant. Le panneau p_{21} se comporte alors comme une zone de reprise de la neige à des phénomènes provenant du panneau p_1 . Il peut en résulter des avalanches coulantes qui se propagent jusque dans le lit du ruisseau de la Fiolaz, en suivant la trajectoire g_{21x} . Le projet d'appareil est localement touché par ces avalanches vers l'altitude 1450 m.

La petite combe p_2 produit des coulées de faible extension, suivant la trajectoire g_2 . Exceptionnellement des flux d'avalanches coulantes g_{2x} peuvent atteindre le pré de Sur l'Ortaz, notamment dans un contexte de redoux (avalanche de neige humide, écoulement très lubrifié). Il nous apparaît peu vraisemblable qu'un tel phénomène atteigne la ligne du télésiège projeté.

Le système de pentes p_3 donne lieu à de petites avalanches coulantes relativement fré-

quement (trajectoires g_3). Le projet de télésiège est concerné par ces écoulements dans leur zone de départ.

Enfin pour mémoire on cite l'activité associée aux panneaux p_4 . Les avalanches identifiées g_4 sont des phénomènes fréquents mais ils ne concernent pas le projet.

2.5 Synthèse

Au terme de cette analyse nous estimons que l'appareil est moyennement exposé au risque d'avalanche.

En situation nivo-météorologique courante ($T \sim 10$ ans), l'appareil est faiblement exposé au risque d'avalanche. La menace principale se porte sur les pylônes dans le tiers inférieur de la ligne.

Aux périodes de retour rares à exceptionnelles ($T > 30$ ans) :

- **la gare inférieure est soumise à un risque d'avalanches de moyenne intensité ;**
- **la ligne est exposée continûment à des avalanches au-dessous de 1550 m d'altitude ;**
- **au-dessus de 1550 m le projet n'est pas concerné par le risque d'avalanche.**

Analyse par simulation numérique des avalanches

3.1 Principe et hypothèses du calcul

Les avalanches sont des phénomènes complexes, reposant sur une multitude de processus depuis la chute de neige jusqu'à l'arrêt de l'écoulement. Il est possible de rendre compte des caractéristiques de l'activité avalancheuse d'un couloir à l'aide de modèles relativement simples. L'analyse par simulations numériques se nourrit des éléments précédents, mais est réalisée de manière totalement indépendante et autonome. Notamment, nous n'avons pas recours à une modification des paramètres pour faire coller les résultats du modèle à l'analyse experte. Comme paramètres d'entrée des modèles numériques, nous avons pris en compte :

1. le découpage en panneaux tiré de l'analyse experte (voir chapitre 2) ;
2. les valeurs des cumuls de neige (voir chapitre 1) ;
3. les valeurs usuellement obtenues sur d'autres sites similaires permettent d'obtenir les coefficients mécaniques des simulations ;
4. des règles expertes tirées de l'utilisation de ces phénomènes dans la reconstitution de l'activité avalancheuse dans des sites bien documentés et dans la simulation de phénomènes extrêmes.

Les valeurs de cumul de neige vues au chap. 1 sont représentatives de l'altitude des zones de départ (dans la tranche 1520–1700 m) :

- $C_3 = 120$ cm pour $T = 30$ ans ;
- $C_3 = 140$ cm pour $T = 100$ ans.

Nous attirons l'attention du lecteur qu'une tendance lourde de l'ingénierie est de recourir massivement aux codes numériques pour le calcul des caractéristiques des écoulements. Malheureusement, l'état de l'art en matière de calcul numérique reste fragile, les incertitudes sont grandes, les résultats des calculs sont très sensibles au choix des paramètres. Les calculs présentés ci-dessous n'ont de sens que s'ils sont regardés de façon critique et contradictoire avec l'analyse experte. C'est ce travail de confrontation qui permet d'aboutir à la définition des efforts le long de la ligne (voir figures 5.1 et 5.2).

3.1.1 Modèle utilisé pour le calcul

Avalanches coulantes

Pour les **avalanches coulantes**, nous avons utilisé le code de calcul AVAC 2.7 fondé sur la résolution d'équations du mouvement avec une loi de frottement de type Voellmy. Il s'agit d'un code numérique développé par Toraval. Ce code a été créé en 1994, est utilisé depuis 1997 et a connu de nombreuses évolutions. Plus d'information sur ce modèle et le calcul des pressions sont disponibles sur le site de [Toraval](#). Le principe général des modèles de calcul est explicité dans l'ouvrage « Dynamique des avalanches » par Christophe Ancey (Presses Polytechniques Fédérales de Lausanne, Lausanne, 2006).

AVAC 2.7 est un code bidimensionnel qui permet de calculer l'évolution sur une topographie complexe d'une masse de neige. Les équations du mouvement sont moyennées selon la hauteur : en un point (x, y) donné du fond topographique atteint par l'avalanche, on caractérise celle-ci par sa vitesse moyenne $\bar{u}(x, y, t)$ et sa hauteur $h(x, t)$. La masse volumique est supposée constante et égale à $\rho = 300 \text{ kg/m}^3$. L'avalanche est soumise à un frottement de type Voellmy ; la contrainte pariétale τ_p est une fonction *ad hoc* censée traduire deux processus : un frottement coulombien (comportement granulaire de l'avalanche) et une résistance inertielle (frottement de l'air, effet centrifuge, etc.) exprimée comme une fonction quadratique de la vitesse

$$\tau_p = \mu\sigma + \rho g \frac{\bar{u}^2}{\xi},$$

avec $\sigma = \rho g h \cos \theta$ la contrainte normale, θ la pente locale, μ et ξ les coefficients de frottement de Voellmy. Quand $\xi \rightarrow \infty$, le modèle de Voellmy dégénère en modèle de Coulomb. Les deux paramètres μ et ξ doivent être ajustés à partir des données de terrain. Il s'agit plus d'une modélisation conceptuelle du frottement que physique car les paramètres ne sont pas mesurables.

Le code calcule deux types de trajectoire :

- *avalanches en régime gravitaire* : les trajectoires sont fortement contraintes par le relief. Les avalanches suivent la ligne de plus grande pente et sont rapidement chenalées dans des talwegs. La plupart des avalanches coulantes appartiennent à cette famille. Les vitesses sont généralement plus faibles que pour des avalanches inertielles et la dissipation d'énergie plus grande (plus grand confinement, sinuosité des trajectoires) ;
- *avalanches en régime inertiel* : les trajectoires sont faiblement contraintes par le relief. Les avalanches atteignent de grandes vitesses, ce qui rend leur trajectoire plus rectiligne (dans l'axe de la pente). Ces avalanches sont en généralement capables d'aller plus loin et de garder un pouvoir directeur.

Lors du calcul, le modèle numérique examine la possibilité d'étalement de l'avalanche :

- soit il considère que l'avalanche coule localement dans un chenal et l'étalement est alors nul ;
- soit il trouve que la topographie locale ne permet pas de confiner l'écoulement de façon suffisante et à ce moment il considère que l'avalanche va progressivement s'étaler. Cet étalement dépend du type de régime : pour un écoulement inertiel, l'avalanche a un « pouvoir directeur » et l'étalement latéral est réduit. Au contraire pour une avalanche coulante en régime gravitaire, l'étalement est plus important, notamment en cas d'avalanches de neige humide (écoulement pulsé ou bien instabilité des langues d'avalanche). On suppose que le taux d'étalement est également fonction de la période

de retour (toujours selon le même principe qu'une avalanche plus rapide a tendance à moins s'étaler).

Lorsqu'il y a étalement, on considère que la largeur de l'avalanche croît de façon régulière tant que l'écoulement reste non confiné. Le taux d'élargissement est supposé constant pour un type d'avalanche et une période de retour donnés. Comme pour les paramètres de frottement, ce taux est déterminé de façon empirique sur la base de notre expérience. Il n'existe pas de méthode de calcul précis de ce paramètre même pour des matériaux plus simples que la neige (un écoulement de sable par exemple).

Avalanches en aérosol

Pour les **aérosols**, nous avons utilisé le code de calcul AERO3D 2.2, fondé sur la résolution du modèle KSBA (Kulikovkiy-Sveshikova-Beghin-Ancey)¹. Il est fondé sur les mêmes principes que le code AVAC, mais prend en compte l'entraînement d'air dans l'aérosol, la reprise de neige au sol, et des variations de volume et de masse. Le code a remplacé en 2004 le modèle AERO 2.0, qui reposait sur le modèle KSB calé avec les données obtenues par Pierre Beghin (Cemagref de Grenoble) ; le modèle KSB (appelé AVAER au Cemagref) souffrait de problèmes importants dans le taux de variation du volume, qui conduisait à une dilution rapide de l'aérosol et donc à une sous-estimation significative de la pression moyenne. Une des forces de ce modèle est qu'il ne nécessite pas de paramètre de calage ; en revanche, il faut lui fournir les épaisseurs de neige mobilisables par l'avalanche au cours de son mouvement. La dynamique de l'avalanche est très sensible au bilan de masse, donc à la quantité de neige qui peut être reprise par l'avalanche. Cette épaisseur est estimée comme étant le volume de neige accumulé sur 3 jours ; seules des pentes supérieures à 25° sont considérées comme mobilisables par l'avalanche.

3.2 Résultats

Les résultats des calculs sont reportés sous forme de cartes. Quelques remarques générales pour accompagner la lecture de ces cartes et en comprendre la portée :

- **Les cartes ont été réalisées pour deux périodes de retour : 30 ans et 100 ans** . Dans les calculs, nous avons considéré que la période de retour de l'avalanche coïncidait avec celle des chutes de neige.
- Compte tenu de la résolution du modèle numérique de terrain et de la capacité actuelle des modèles dynamiques d'avalanche, la précision du calcul est au mieux de l'ordre de 10 m pour les emprises reportées.
- Les cartes reportent les emprises d'avalanches comme si tous les panneaux des zones de départ s'étaient **simultanément** déclenchés. Naturellement, en pratique, un tel cas de figure ne se produit pas nécessairement mais, en l'absence d'observations suffisantes, nous n'avons pas discriminé les cas où les panneaux fonctionnent collectivement de ceux où seule une partie de la zone de départ est mise en mouvement.
- L'influence du vent n'a pas été prise en compte pour les phénomènes extrêmes. En effet, il est difficile, si ce n'est impossible, d'estimer les zones à ablation ou dépôt avec précision.

1. ANCEY, C., Powder-snow avalanches: approximation as non-Boussinesq clouds with a Richardson-number-dependent entrainment function, *Journal of Geophysical Research*, **109**, F01005, 2004

- Le résultat reporté (selon un code de couleur spécifié) est la valeur maximale atteinte par la pression moyennée (dans le temps) au sein de l'avalanche (c'est-à-dire le terme cinétique en $\rho \bar{u}^2/2$, avec \bar{u} la vitesse moyenne de l'avalanche et ρ la masse volumique locale). **Cette pression au sein de l'avalanche ne permet pas de déduire instantanément la pression d'un impact** car celle-ci dépend d'autres paramètres comme la forme de l'objet, la direction de sollicitation, et le mode d'interaction entre l'objet et l'avalanche. Selon les phénomènes (avalanche inertielle), les pressions peuvent se caractériser par un spectre avec des fréquences caractéristiques de l'ordre de 10–100 Hz et des pics de surpression pouvant atteindre 3 fois la valeur moyenne. Ce cas de figure ne se présente pas pour les petites avalanches.
- Les largeurs dans les zones de dépôt sont mal estimées.

3.2.1 Avalanches rares ($T \sim 30$ ans)

↪ Voir carte 3.1. Coordonnées RGF93. Échelle initiale 1 : 5000.

Les simulations montrent :

- une activité avalancheuse essentiellement sur le couloir CLPA n° 3 sous le Morclan ;
- des avalanches de puissance significative, avec une pression cinétique atteignant 50 kPa dans la zone d'écoulement ;
- des avalanches atteignant le lit du torrent de la Fiolaz.

La ligne du TS est donc localement menacée sur une partie limitée et bien circonscrite de son tracé, le niveau de pression est modéré, et les gares ne sont pas concernées.

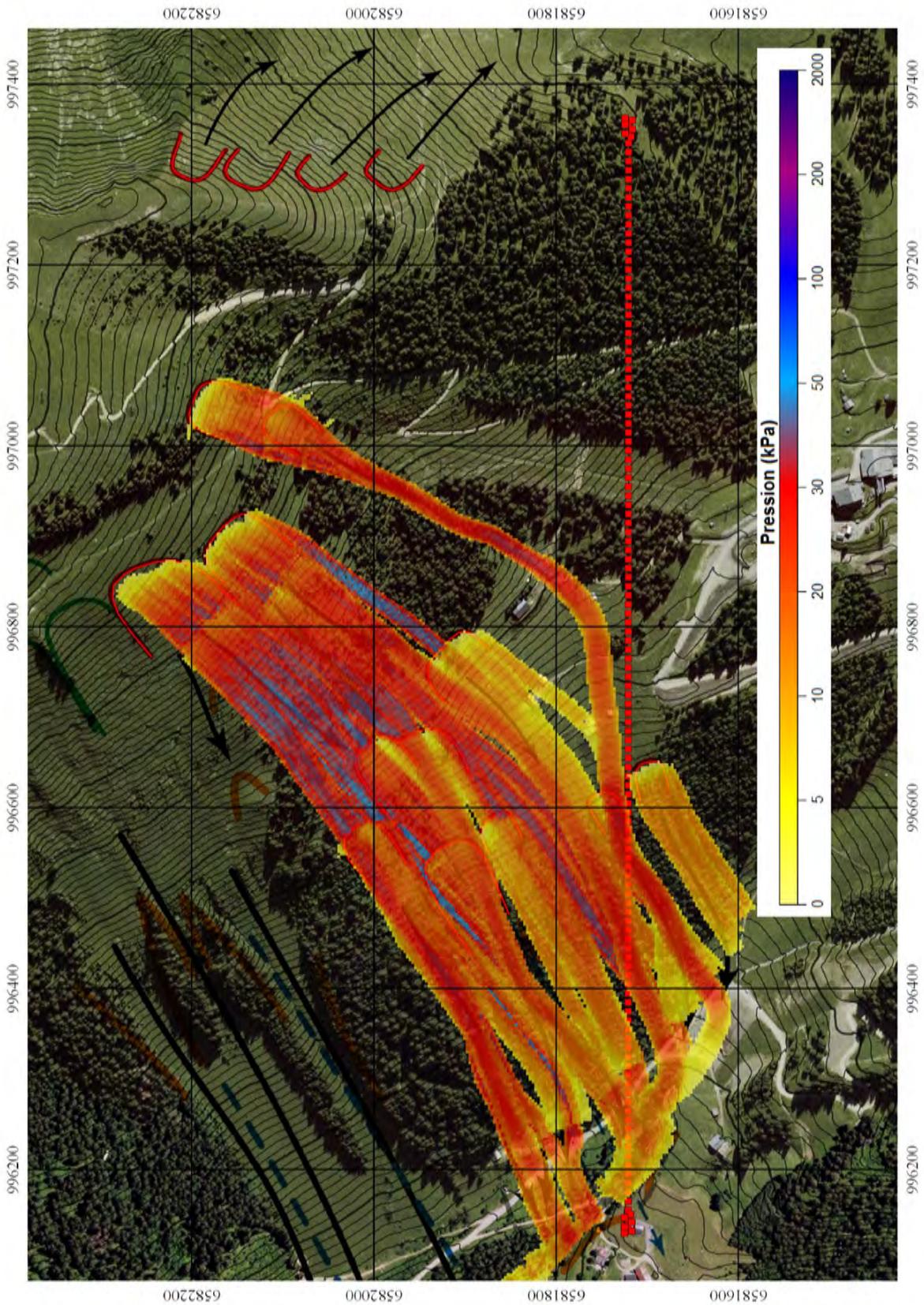


Figure 3.1 : carte des simulations numériques montrant l'emprise maximale et la distribution des pressions cinétiques maximales au sein de l'avalanche pour $T = 30$ ans et des avalanches en régime gravitaire.

3.2.2 Avalanches exceptionnelles ($T \sim 100$ ans)

↪ Voir carte 3.2. Coordonnées RGF93. Échelle initiale 1 : 5000.

Les simulations montrent :

- une activité avalancheuse plus importante sur le couloir CLPA n° 3 ;
- des avalanches d'assez forte puissance, avec une pression cinétique dépassant 50 kPa sur la majeure partie de la zone d'écoulement et atteignant localement 70 kPa ;
- des écoulements jusque dans le torrent de la Fiolaz ;
- des effets de souffle potentiellement importants qui peuvent atteindre le lieu-dit « Sur le Crêt ».

La ligne du TS est donc localement menacée sur la partie inférieure du tronçon. La gare supérieure (G2) n'est pas concernée, mais la gare G1 est dans le prolongement des langues d'avalanche les plus rapides. On ne peut écarter que la gare G1 soit touchée par une langue d'avalanche en fin de vie, voire par l'effet de souffle si l'avalanche se présente sous la forme d'un aérosol.

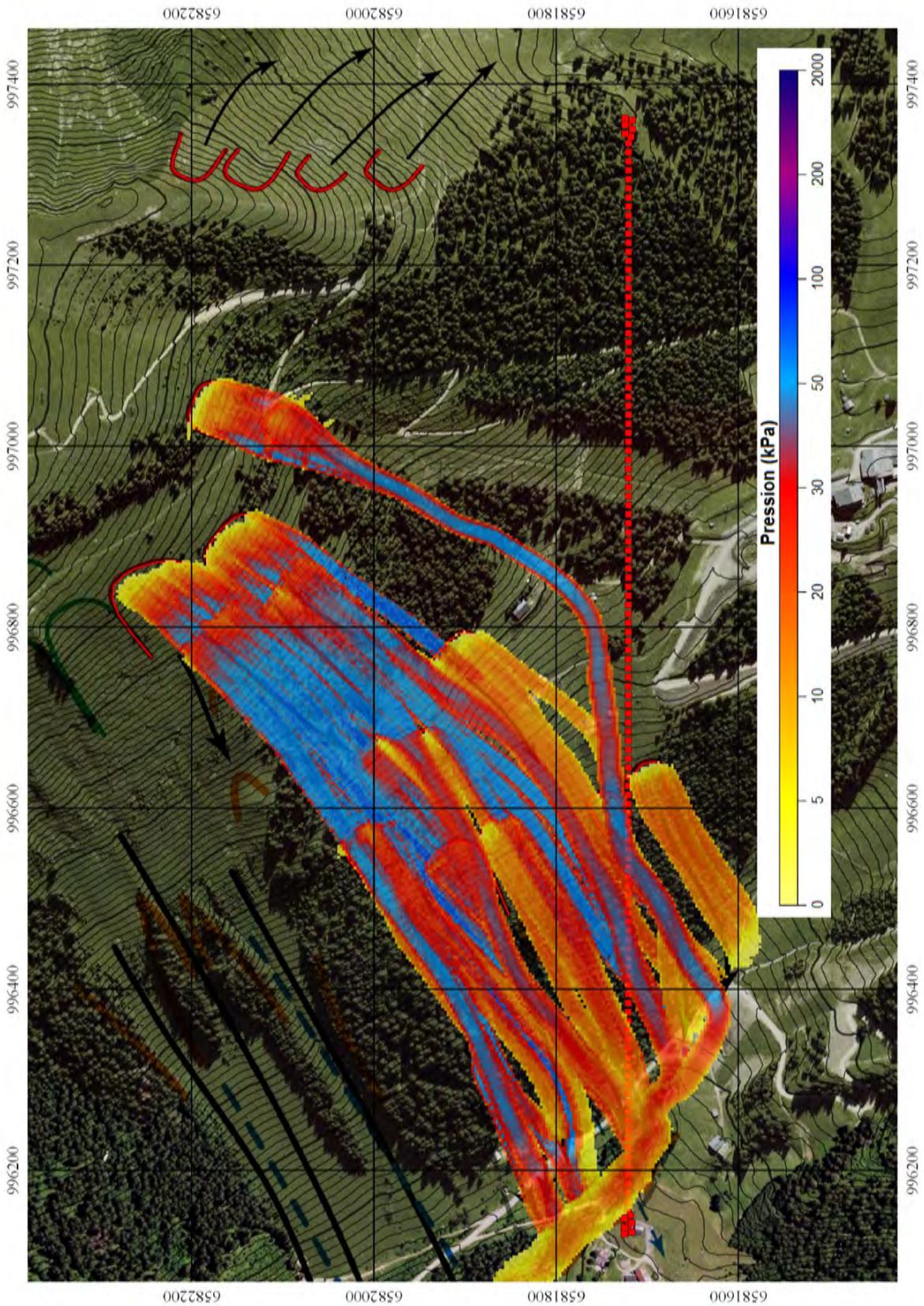


Figure 3.2 : carte des simulations numériques montrant l'emprise maximale et la distribution des pressions cinétiques maximales au sein de l'avalanche pour $T = 100$ ans et des avalanches en régime gravitaire.

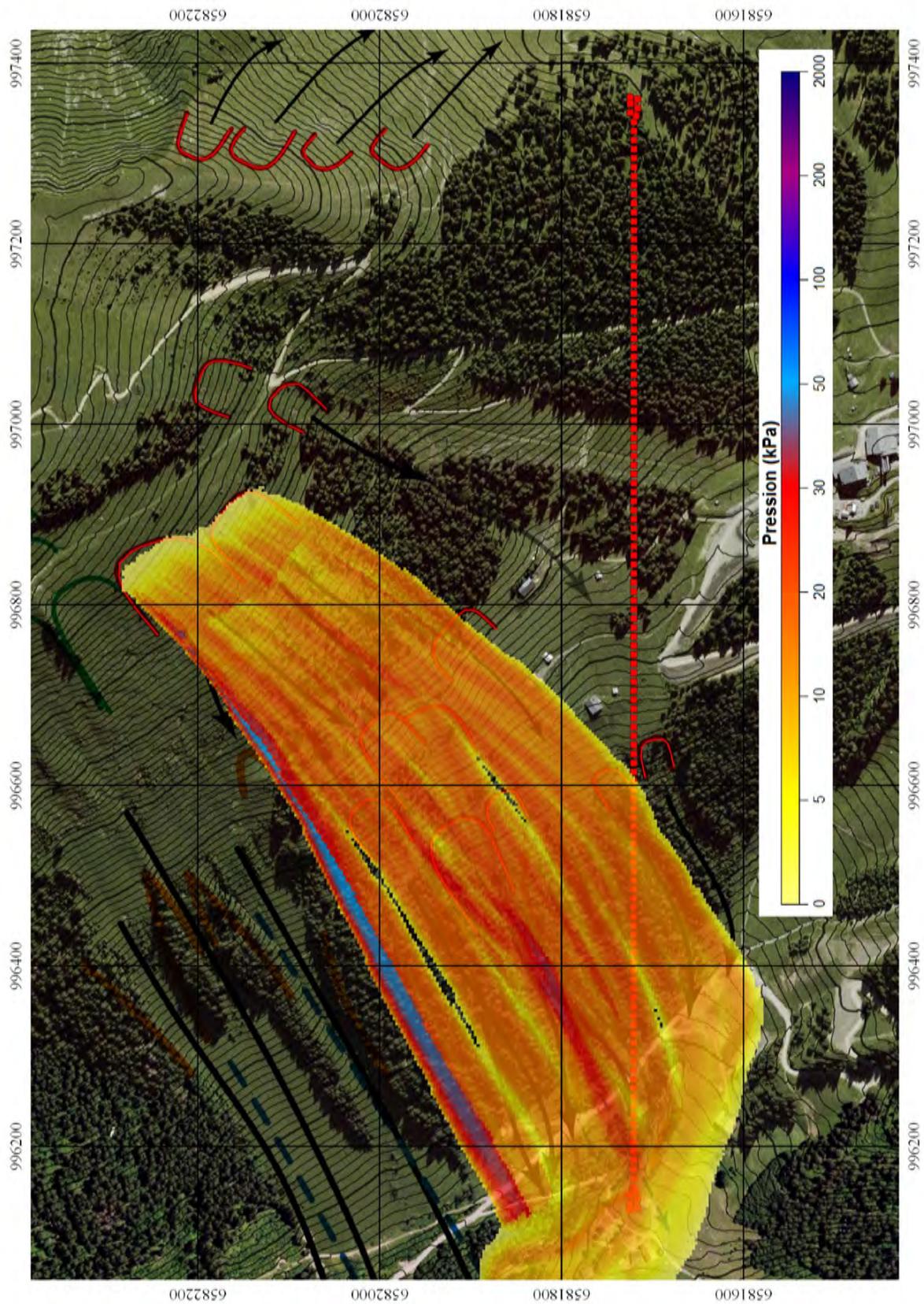


Figure 3.3 : carte des simulations numériques montrant l'emprise maximale et la distribution des pressions cinétiques maximales au sein de l'avalanche pour $T = 100$ ans et des avalanches en aérosol.

Analyse du risque torrentiel

Dans le présent chapitre, après analyse des données historiques, nous mettons en œuvre deux approches pour estimer les débits et hydrogrammes de crues exceptionnelles (associées $T = 100$ ans en période de retour) :

- une approche hydrologique classique où l'on cherche à estimer les débits à partir de formules empiriques permettant de passer des pluies aux débits (voir § 4.4) ;
- une approche hydraulique classique où l'on simule le ruissellement dû à une pluie de projet et l'on détermine quels sont les débits qui en résultent (voir § 4.5).

4.1 Données et contexte

Nous avons utilisé :

- données LiDAR fournies par le maître d'œuvre ;
- Guide méthodologique édité par le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement « Plans de prévention des risques naturels (PPR) : risques d'inondation » (La documentation française, Paris, 1999) ;
- le code académique [Iber](#) développé par un consortium d'universités espagnoles pour les calculs de ruissellement ;
- les méthodes décrites dans le cours de master de C. Ancey « Risques hydrologiques et aménagement du territoire » (EPFL, Lausanne, 2017) ;
- [pièces du PPR](#) (PPR en date du 3 novembre 2011, révisé le 12 octobre 2015) ;
- les données météorologiques du chap. 1 ;
- vues aériennes IGN de 1952 et 1974 que nous avons complétées à l'aide de la vue aérienne actuelle tirée de www.geoportail.fr ;
- une recherche sur les débordements torrentiels entreprise par M. Gérard Panisset, généalogiste-paléographe (Naves-Parmelant), auprès des archives départementales ;
- articles de presse récents (Dauphiné Libéré et Messenger, édition Haute-Savoie) : 24 juillet 1992 (débordement de la Fiolaz), 26 juin 2003 (route d'accès au Linga coupée), coupure du 18 et 21 juillet 2004 (affouillement dans la Fiolaz), et le compte-rendu de la crue de juillet 2004 sur le site valdabondance.com ;
- des clichés des crues de 1992 et 2000 pris par M. Thierry Hauteville et M. Jean-Marie André ;

- l'ouvrage « les torrents de la Savoie » par Paul Mougin, publié en 1914 par la Société d'histoire naturelle de la Savoie ;
- premier livret du rapport d'Alp'Géorisques (Domène) daté d'août 2006 ;
- rapport d'Hydrétudes (Annecy) pour la commune de Châtel daté de mars 2003 (n° 02-145) et intitulé « Aménagements pour lutter contre les débordements du ruisseau de la Fiolaz » ;
- rapport du service RTM rédigé par M. Guy Fournier en date du 18 septembre 2002 et portant sur un état des travaux à réaliser. Ce rapport mentionne des crues en juillet 1992, juillet 1995, juillet 1999, juillet et août 2000 ;
- les fiches de renseignement du service RTM communiquées par Jérôme Liévois du RTM ;

4.2 Contexte

Le torrent de la Fiolaz est entièrement situé sur la commune de Châtel même si une partie du bassin-versant est en Suisse. Dans le langage vernaculaire, la racine *fiol* (ainsi que les graphies approchées) renvoie à la notion de forêt sur une pente, assez souvent une hêtraie ou bien une forêt clairsemée.

4.2.1 Hydrographie

Le torrent de la Fiolaz draine un petit bassin-versant d'environ 2 km², constitué par la face sud-est du Morclan (1970 m) et le versant nord du Roc du Cheval Blanc Gravé (non coté) et le Bec du Corbeau (1995 m). Le torrent est un affluent de la Dranse d'Abondance (confluence vers la cote 1080 m). Il n'y a pas une source unique, mais la convergence d'au moins deux ruisseaux : la Conche et la Combe, qui se rejoignent au-dessus du Crêt, vers la cote 1450 m. La zone de sources est un terrain d'alpage humide : avant la construction d'une retenue collinaire pour la neige de culture, une zone marécageuse appelée « la Mouille » se trouvait au pied du Roc du Cheval Blanc Gravé vers 1570 m d'altitude ; le ruisseau de la Conche est vraisemblablement une résurgence des eaux infiltrées.

4.2.2 Géologie et fourniture en sédiment

Géologiquement, le sol est composé de placages morainiques. Il y a eu vraisemblablement un petit appareil glaciaire, qui devait rejoindre vers 1400 m le gros glacier qui occupait l'actuelle plaine de la Dranse. Une autre retenue, plus ancienne et peut-être naturelle, se trouve de l'autre côté de la frontière avec la Suisse. Globalement l'essentiel du bassin-versant est couvert de pelouses (zones de pâturage), mais avec la réduction de l'activité pastorale, il y a aussi une reconquête forestière assez marquée depuis la fin de la seconde guerre mondiale. Localement, notamment dans la face sud-est du Morclan, des affleurements rocheux apparaissent, mais cela reste très marginal. Aucun point dur lié au substratum rocheux ne semble donc apparaître dans le bassin-versant. Par ailleurs, notons l'absence de zones de production de sédiment (zone d'éboulis, « clappes »). Le matériau solide transportable par le torrent est donc constitué uniquement des débris morainiques entraînés par le torrent en crue.

4.2.3 Morphologie du lit

Le lit de la Fiolaz n'apparaît comme réellement formé que sous la piste qui mène de « Sur le Crêt » au Petit-Châtel, vers l'altitude 1410 m. Le lit a incisé le flanc montagneux de la rive droite de la Dranse sur une profondeur d'environ 30 m entre les cotes 1250 et 1300 m. Le lit marque une inflexion dans sa trajectoire, avec un virage à environ 90°. La pente y est également relativement forte : environ 40 à 50 %. La pente reste forte jusqu'au pont du Bouchet vers 1200 m, puis diminue assez rapidement pour rester autour de 20 %. La diminution de pente est également accompagnée d'une réduction de la profondeur d'incision du lit : le lit est de moins en moins marqué entre la route du Bouchet et la route de Thonon (RD 22), ce qui permet de penser que compte tenu des obstructions, des débordements sont assez faciles. Toutefois, l'incision est suffisamment profonde pour que le lit ne balaie pas le versant. Aucune trace de divagation ou même de dépôt torrentiel n'est visible. Il n'y a pas vraiment de cône de déjection. Sous la route de Thonon, l'incision ne dépasse pas 10 m en profondeur et le lit majeur s'élargit, notamment vers la Béchigne.

4.2.4 Type de crue

Le régime hydrologique du ruisseau est typiquement nivo-pluvial : une grande partie des débits est liée à la fonte du manteau neigeux, à son infiltration dans le sol, et son drainage. Toutefois cela ne constitue pas le scénario classique de formation de crue.

La principale cause de crues est liée aux orages : les crues se produisent lors de fortes, mais courtes pluies causées par des cellules orageuses que l'on rencontre durant l'été (juin à septembre) quand il fait très chaud (comme en juin 2003). Pour les petits bassins-versants de montagne en Suisse et en France faisant l'objet d'un suivi scientifique (torrent d'Erlenbach, Suisse ; Brusquet, vers Dignes-les-Bains), le débit spécifique de pointe en condition décennale est de l'ordre de 3–4 m³/s/km² en moyenne (fourchette 1–15 m³/s/km²). Le débit centennal estimé (faute de mesures directes, il s'agit d'extrapolation) donne des débits de pointe centennaux spécifiques entre 10 et 30 m³/s/km² !

L'histoire du torrent de la Fiolaz sur les 30 dernières années montre que le torrent n'est pas très sensible aux pluies longues (mais moins soutenues que les orages d'été). Des systèmes dépressionnaires très actifs peuvent provoquer des pluies fortes sur des étendues importantes (juillet et surtout août 1987, octobre 2000 sur le val d'Aoste et le Valais, août 2005 sur les Alpes du Nord) et causer des crues d'ampleur, mais lors de tels épisodes météorologiques défavorables, la Fiolaz n'a pas connu de crue dommageable.

4.3 Historique du site

4.3.1 Archives

Dans la monographie de Mougin, les pages 217 à 233 sont consacrées aux crues historiques (depuis le xv^e siècle) de la Dranse et ses affluents ainsi qu'aux travaux de protection entrepris depuis les premiers comtes de Savoie jusqu'au début du xx^e siècle. Aucun événement n'est relatif à Châtel dans la longue litanie des crues ayant affecté le bassin-versant de la Dranse.

La recherche a porté sur les coupures de presse depuis 1924 dans le *Messenger* et le *Dauphiné Libéré* (après guerre), les délibérations du conseil municipal déposées aux archives, les rapports

de différents services de l'État (gendarmerie, Équipement). Elle fournit les points suivants :

- les archives n'ont pas d'élément relatant une crue sur le torrent de la Fiolaz hormis les coupures de presse relatives à la crue du 20 juillet 1992 dans le *Messageur* ;
- il est possible mais non certain qu'une crue se soit produite en 1944 ;
- la première crue importante et assez bien documentée date de juillet 1992. D'après le *Messageur*, ce sont quelque 1500 à 2000 m³ de matériaux qui ont été entraînés et déposés par le torrent ;
- une implantation humaine pérenne le long du torrent depuis au moins le tout début du xx^e siècle. Plusieurs maisons ont été construites à proximité du torrent ;
- jusqu'aux travaux de piste sur Super-Châtel, le bassin-versant était très bien végétalisé. Aucune zone à nu n'est visible sur les photographies anciennes, l'ensemble des terrains étant consacré au pâturage des vaches et des chèvres. On note à partir des années 1970 un accroissement des zones boisées, probablement à cause de la réduction de l'activité pastorale. Dans le même temps, on note que les travaux des pistes ont mis à nu le terrain ;
- le lit est bien marqué sous le Crêt et n'a pas changé au cours du xx^e siècle. Le lit a été bordé d'arbres depuis au moins le début du xx^e siècle. Il n'y a pas à proprement parler de cône de déjection.

4.3.2 Fonds RTM

Les fiches événements du RTM indiquent :

- fiche 7406300011 : crue du 20 juillet 1992. Un orage très violent se déclenche vers 19 h le 20 juillet. Le torrent déborde à chaque pont, causant des dommages (3 maisons engravées, 2 véhicules endommagés, pistes de ski érodées) et coupant les routes,
- fiche 7406300016 : crue du 18 juillet 1999. Un orage de grêle se déclenche au-dessus de Super-Châtel vers 17 h 30 et amène à de fortes précipitations pendant 30 minutes. La Fiolaz ne déborde pas, mais le fort transport solide conduit à une obstruction des cinq ponts et à la coupure des routes ; c'est le pont du Roitet qui a été le plus concerné par les dépôts de sédiment,
- fiche 7406300015 : crue du 5 juin 2000. Un orage violent se fixe pendant environ 1 h (vers 17 h) entre le Morclan et Super-Châtel. Quatre bâtiments sont inondés et le pont du petit Châtel est obstrué, ce qui conduit à la coupure de la route à cet endroit. Des mesures d'urgence sont prises pour curer le lit du torrent,
- fiche 7406300001 : crue du 2 juin 2003. Un orage violent d'une demie heure déverse des quantités d'eau importantes sur Super-Châtel, entraînant un ravinement important des pistes de ski qui venaient d'être terrassées. Le bassin à la confluence des deux bras amont de la Fiolaz (Conche et Combe) est rempli. Le pont du Roitet est de nouveau obstrué par les dépôts de sédiment tandis que le pont « vers chez Loubies » est affouillé ; la rive gauche est érodée. Le passage busé de la Béchigne est obstrué par 150 m³ de sédiment. Le RTM recommande de revoir le plan de zonage PPR le long du torrent et un suivi du torrent,
- fiche 7406300003 : crue du 5 juin 2003. Un orage violent d'une demie heure se fixe sur Super-Châtel et cause d'intenses précipitations. Le pont du Roitet est de nouveau engravé tandis que de petits débordements causent des inondations dans des bâtiments. La route départementale est coupée. Le RTM recommande de revoir le pont du Roitet et d'entreprendre une série de travaux pour aménager le torrent,

- fiche 7406300065 : crue du 16 juillet 2004. Un orage se poursuit pendant quelques heures durant la nuit, amenant à une inondation au hameau des quatre saisons et l'obstruction des ponts du Boude et de Béchigne. La route départementale est de nouveau coupée.

M. Guy Fournier (technicien RTM, qui a été en charge de la vallée pendant environ 25 ans) indique :

- le torrent a connu une succession de crues, notamment le 5 juin 2000, le 2 et le 5 juin 2003, le 17 juillet 2004,
- la double crue de juin 2003 a fortement déstabilisé le lit (dépavage du lit, attaque des berges),
- cela a motivé un important programme de travaux, avec la construction d'un seuil bétonné de 3 m au Boude (hameau le plus en amont) et la pose d'enrochements au niveau du pont de la Béchigne (avant la confluence avec la Dranse),
- aucune explication n'est avancée pour expliquer l'occurrence de crues rapprochées, mais il se peut que la construction d'une retenue dans la partie supérieure du bassin-versant ait modifié le fonctionnement du torrent ;

Les pièces du PPR mentionnent trois crues :

- 20 juillet 1992 : routes de Béchigne, du Roitet, et RD 22 couvertes de gravier,
- 18 juillet 1999 : érosion de berges – sans débordement – dans le lit mineur du torrent de la Fiolaz,
- 16-17 juillet 2004 : déstabilisation de berges avec débordement hors du lit mineur du torrent de la Fiolaz.

4.4 Évaluation hydrologique des crues torrentielles

L'occurrence d'une crue importante est ici conditionnée par plusieurs facteurs dont la taille du bassin-versant, la forte rugosité (forêt, pré), la forte perméabilité du sol, la forme en entonnoir du terrain concentrant les eaux de ruissellement dans le torrent de la Fiolaz. **Le scénario critique est ici un orage intense, mais bref.** L'analyse historique et l'examen des caractéristiques hydrologiques et morphologiques poussent à considérer des pluies de durée horaire.

Un autre scénario (critique pour de nombreux bassins-versants de montagne) pourrait être rencontré lorsqu'il y a

- une forte saturation du sol après une longue période pluvieuse ;
- une cellule orageuse sur Châtel ; et/ou
- une concomitance d'un manteau neigeux épais durant l'hiver (sol saturé) et d'une crue.

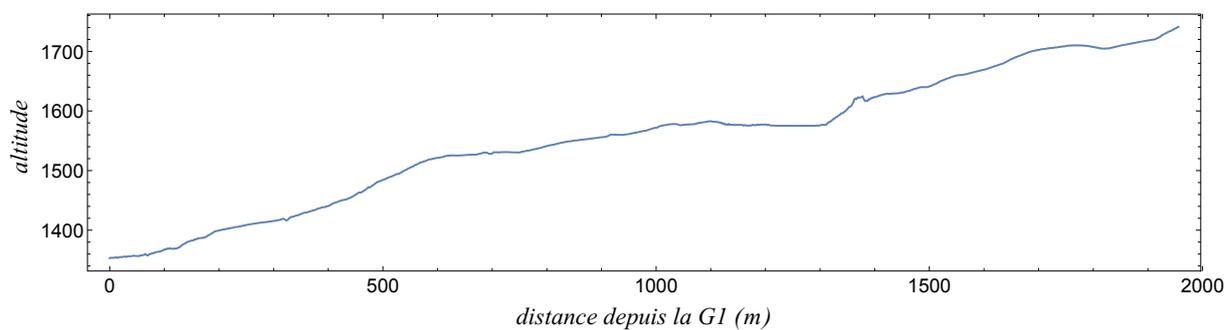


Figure 4.1 : profil en long du torrent de la Fiolaz entre l'amont de la retenue de la Mouille et la gare G1.

Nous cherchons ici à quantifier une crue extrême de période de retour 100 ans. La surface drainée par le torrent jusqu'à la gare représente environ $2,2 \text{ km}^2$ au droit de la G1. Comme nous cherchons à établir la borne supérieure des débits de pointe, nous avons considéré des combinaisons particulièrement défavorables des facteurs du calcul, quitte à surestimer les débits. Les données de pluie sont celles du poste de Météo-France à Châtel (série continue commençant en 1972). La pluie journalière décennale centrée est $P_{10} = 88 \text{ mm}$ et la pluie journalière centennale atteint 111 mm . Le gradex des précipitations journalières est moyennement fort puisqu'il est proche de 14 mm . Malgré la différence d'altitude (800 m), le poste de Châtel permet d'avoir une idée correcte des pluies sur tout le bassin-versant.

4.4.1 Estimation des quantiles de débit rares à extrêmes

Il n'y a pas de mesures de débit à notre connaissance sur le torrent. Classiquement, à défaut de mesure, on procède à des estimations empiriques. Ces estimations sont très grossières et cela d'autant plus que le bassin-versant est de petite taille ($2,2 \text{ km}^2$) et de pente moyennement forte (20 % de moyenne 400 m en dénivellation). L'hydrologie des petits bassins-versants de montagne reste globalement assez mal connue. On fournit ici ce que prédisent les principales formules empiriques, mais il faut garder à l'esprit leur caractère très rudimentaire. On commence par examiner les temps caractéristiques qui apparaissent dans l'analyse/prédétermination des crues, puis on s'intéresse à la relation intensité/fréquence pour le débit de pointe.

Temps de concentration

Le temps de concentration est défini comme le temps que mettrait une goutte de pluie pour parcourir tout le bassin-versant ; c'est aussi un temps critique pour la durée des pluies, qui sert dans de nombreuses formules de transformation pluie-débit.

- Turrazza : $t_c = 26$ min
Paramètres
 - coefficient de ruissellement : 1
 - coefficient de Montana ($T = 10$ ans) : 29
 - coefficient de Passini : 0,11
- Venturi-Passini : $t_c = 26$ min
Paramètre
 - coefficient de Turrazza : 0,108
- Kirpich : $t_c = 13$ min
- Sogreah : $t_c = 12$ min
Paramètre
 - coefficient de ruissellement : 1
- Izzard-Meunier : $t_c = 40$ min
Paramètre
 - coefficient α : 238

Le temps de concentration est trouvé ici varier entre 11 min (formule Sogreah) à 40 min (formule Meunier). Une durée de 30 min nous semble être un ordre de grandeur correct compte tenu de la pente (forte) et la résistance au ruissellement ; cela semble aussi cohérent avec les observations rapportées par les riverains.

Durée caractéristique

La durée caractéristique de crue d_s est la durée pendant laquelle le débit est supérieur au débit moyen de la rivière.

- formule nationale Socose : $d_s = 19$ h ;
- formule nationale Socose : $d_s/5 = 6,2$ h (valeur recommandée pour les petits bassins-versants) ;
- formule calée sur de petits bassins-versants rapides : $d_s = 55$ min ;
- formule calée sur des bassins-versants à forte pente : $d_s = 7,5$ h.

Là encore, on trouve des résultats très variables couvrant une fourchette large entre 55 min et 20 h ; compte tenu de la petite taille du bassin-versant et des pentes fortes, on prend ici $d_s = 60$ min. Le temps d_s vaut $2t_c$, ce qui est cohérent ici (crue consécutive à un orage).

Débit de pointe

Il existe plusieurs formules empiriques donnant le débit de pointe de la crue décennale :

- méthode SCS (petits bassins-versants rapides) : $Q_p(10) = 5,8$ m³/s
Paramètres
 - coefficient de ruissellement : 1

- $J = 40$ mm
 - débit moyen $Q_m = 4,5$ m³/s
 - méthode Socose (formulation nationale): $Q_p(10) = 2,2$ m³/s
- Paramètres
- $\xi = 0,95$
 - nombre intermédiaire $\rho = 0,93$
 - interception potentielle $J = 38$ (mm)
 - indice pluviométrique $k = 26$
- méthode dite rationnelle: $Q_p(10) = 5,8$;
 - méthode Crupédix: $Q_p(10) = 3$ m³/s;

Les formules de débit de pointe donne une fourchette de Q_{10} entre 1 et 6 m³/s. **Une valeur du débit de pointe décennal $Q_{10} = 3$ m³/s semble raisonnable**, soit un débit spécifique décennal voisin de 1,5 m³/s/km², ce qui est proche de la borne inférieure des petits bassins-versants rapides et non-dégradés (de montagne) instrumentés en France et en Suisse (plage 0,4 à 14 m³/s/km²); la borne supérieure est surtout observée pour des bassins-versants dégradés. Si on pense que la loi en fréquence est similaire à celle des pluies, **on obtiendrait un débit centennal de l'ordre de 4 m³/s.**

À notre connaissance, il n'existe aucune méthode vraiment adaptée à la détermination des crues extrêmes sur un petit bassin-versant de montagne, à pente forte, assez perméable, et caractérisé par un régime nivo-pluvial. Les méthodes classiques fondées sur une représentation conceptuelle des transferts d'eau au moment de la crue (méthodes de type SCS, Socose) sont très peu précises pour les petits bassins-versants de montagne (sous-estimation du ruissellement, influence du manteau neigeux). Les méthodes hydrostatistiques fondées sur l'utilisation du gradex (méthode Agrégée ou bien QdF) calquent le comportement des débits sur celui des précipitations et ne tiennent pas compte de la fonte nivale, ce qui peut conduire à une sous-estimation importante de la fréquence et de l'intensité des crues.

Ici, en première approximation et compte tenu du scénario choisir pour la génération des crues, on peut néanmoins tenter d'appliquer la méthode dite QdF¹, qui est la plus pertinente pour les petits bassins-versants de montagne.

On a estimé à partir des gradex des pluies sur quelques heures les débits correspondants. La figure 4.2 montre que la réponse hydrologique est à la frontière entre la réponse d'un bassin-versant de type « Soyans » et celle d'un bassin « Florac ». Compte tenu des pentes relativement soutenues et de la sensibilité du site aux orages, il est vraisemblable que le comportement soit plus proche d'un bassin-versant méditerranéen (réponse brutale) pour les petits pas de temps (durée de quelques heures). La figure 4.2 confirme que pour des durées de pluie d inférieures à 3 heures, la réponse est plutôt de type méditerranéen. La figure 4.3 montre la courbe intensité/fréquence pour le débit de pointe selon que l'on opte pour un modèle Florac ou Soyans. Le changement de comportement aux grandes périodes de retour est très net et nous semble réaliste ici.

1. méthodologie développée au Cemagref qui vise à décrire la variation du débit Q en fonction de la durée d et de la fréquence de retour F . Cette méthodologie se base sur une exploitation statistique des données de trois bassins-versants types : Soyans, Florac, Vandenesse. La réponse hydrologique de ces bassins-versants est typique d'un climat plutôt méditerranéen (Soyans) ou océanique (Vandenesse), avec des différences liées à la capacité de rétention et au ruissellement ; Florac est ainsi une version atténuée (ruissellement moindre et moins rapide) du modèle « Soyans ».

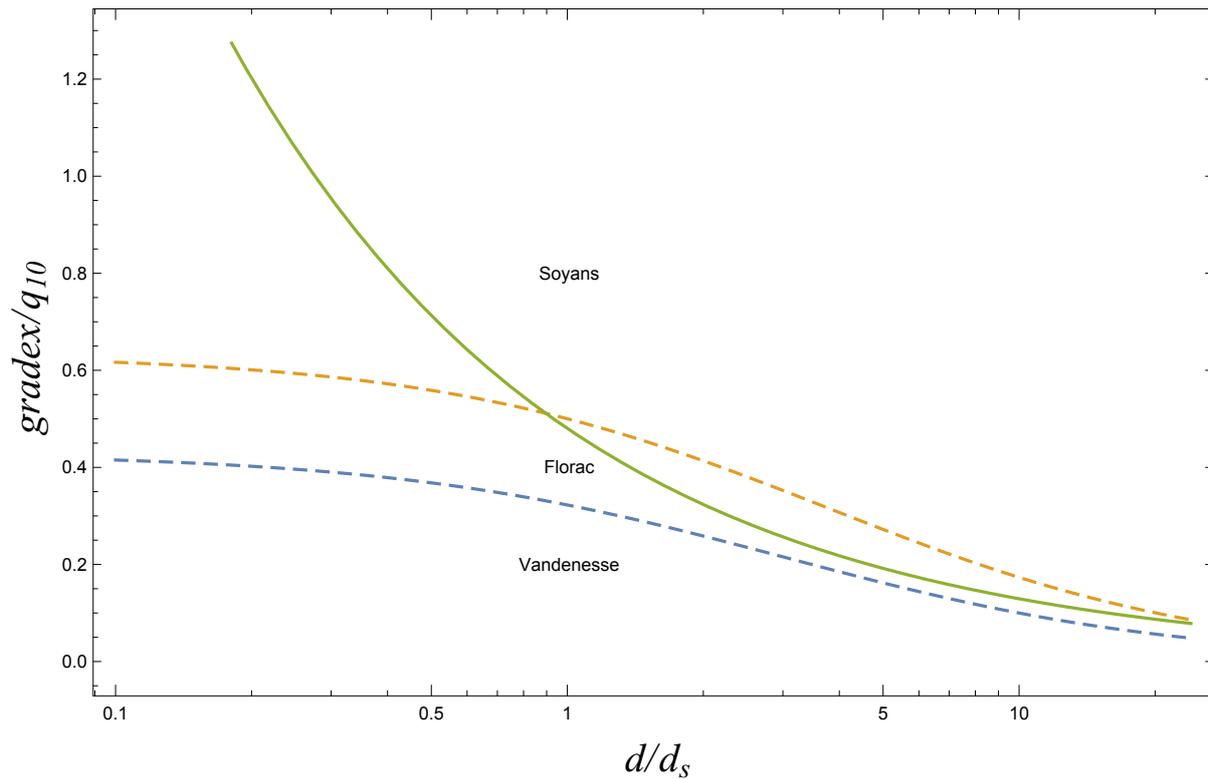


Figure 4.2 : comparaison de la réponse hydrologique estimée pour la Dranse avec les réponses typiques des bassins-versants considérés par la méthode QdF. On a reporté la variation du gradex adimensionné des débits en fonction de la durée (adimensionnée) de la crue : c'est la courbe continue. Les courbes à trait discontinu délimitent les domaines typiques de réponse hydrologique : domaine Soyans, domaine Florac, et domaine Vandenesse.

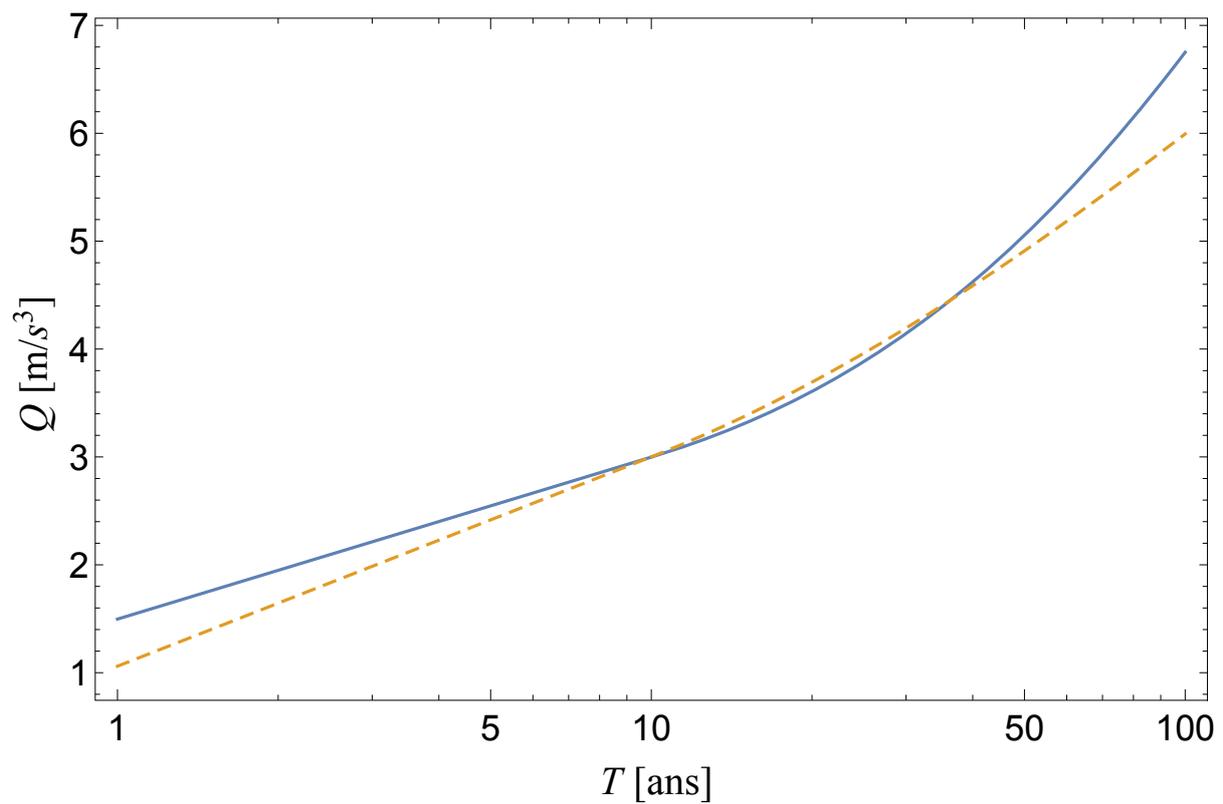


Figure 4.3 : variation du débit de pointe avec la période de retour selon le modèle considéré pour l'extrapolation ; modèle Soyans (trait continu) ou Florac (trait discontinu).

Hydrogramme synthétique de crue

L'hydrogramme synthétique est une variation typique idéalisée du débit au cours du temps. La méthode QdF permet de construire un tel hydrogramme en respectant les diverses contraintes sur le temps de montée, le débit de moyen, et le volume moyen de crue. La figure 4.4 montre l'hydrogramme synthétique pour deux périodes de retour : $T = 10$ ans et $T = 100$ ans.

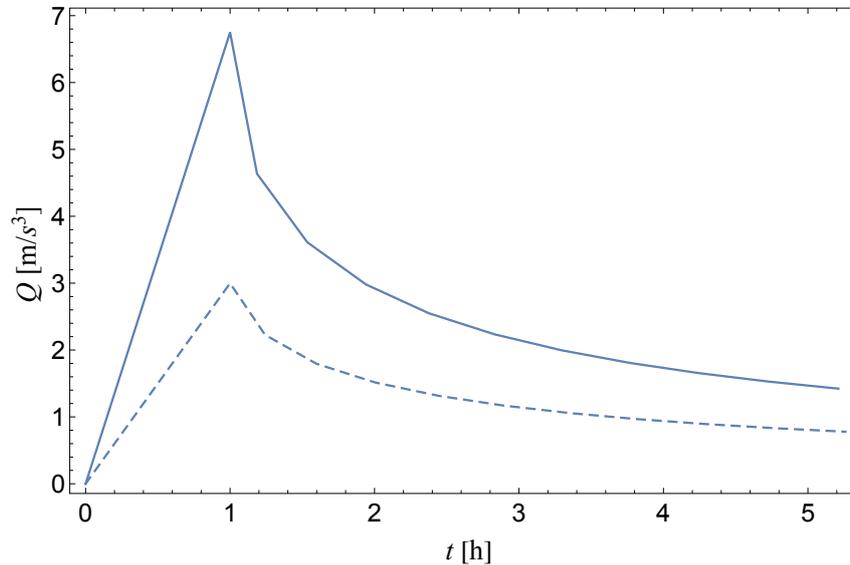


Figure 4.4 : variation du débit au cours du temps pour deux périodes de retour ; $T = 10$ ans (trait discontinu) ou $T = 100$ ans (trait continu) d'après la méthode QdF.

4.4.2 Synthèse

L'estimation empirique par l'approche hydrologique fournit des débits :

- de pointe de période de retour $T = 10$ ans autour de $Q_p = 3 \text{ m}^3/\text{s}$;
- de pointe de période de retour $T = 100$ ans autour de $Q_p = 7 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.5 Modélisation hydraulique

4.5.1 Hypothèses du calcul

Le calcul du ruissellement et de la formation d'une crue reste un problème difficile. Les modèles numériques actuels ou les simulations sur modèle réduit ne permettent que d'obtenir une approximation du phénomène physique réel.

Pour évaluer l'impact d'une crue due à un fort ruissellement, nous avons réalisé des calculs simplifiés en posant les hypothèses suivantes :

- **La crue est modélisée à l'aide d'un modèle de Saint-Venant**

$$\frac{\partial}{\partial t}h + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0, \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}hu + \frac{\partial}{\partial x}hu^2 + \frac{\partial}{\partial y}huv + gh\frac{\partial}{\partial x}h = -gh\frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\tau_{p,x}}{\rho}, \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}hv + \frac{\partial}{\partial x}huv + \frac{\partial}{\partial y}hv^2 + gh\frac{\partial}{\partial y}h = -gh\frac{\partial z}{\partial y} - \frac{\tau_{p,y}}{\rho}, \quad (4.3)$$

avec $h(x, y, t)$ la hauteur moyenne d'eau dans la section d'écoulement, $z(x, y, t)$ est la cote du fond, et $\mathbf{u} = (u(x, y, t), v(x, y, t))$ la vitesse moyenne. La contrainte de frottement $\boldsymbol{\tau}_p = (\tau_{p,x}, \tau_{p,y})$ est choisie de type **Manning-Strickler**

$$\boldsymbol{\tau}_p = \frac{\rho g}{K^2} \frac{u}{h^{1/3}} \mathbf{u}, \quad (4.4)$$

avec g la gravité, ρ la masse volumique, et K le coefficient de Manning-Strickler. Dans le cas présent, compte tenu de nombreux pertes de charge singulières, le frottement de forme est bien supérieure au frottement de peau. Aussi, nous avons pris une valeur relativement basse de K , typique des torrents à forte pente : $K = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Pour la zone végétalisée du bassin-versant, la vitesse de ruissellement est attendue être faible, et de ce fait, nous avons pris $K = 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ pour le terrain naturel en dehors du lit torrentiel.

- On ignore le transport solide.
- Nous avons utilisé le code académique **Iber** développé par un consortium d'universités espagnoles. Il est basé sur un solveur bidimensionnel de type volumes finis des équations de Saint-Venant sur des maillages destructurés²
- Pour la topographie, nous avons généré un modèle numérique de terrain (MNT) global comprenant des données de différentes origines :
 - pour le bassin-versant, nous avons utilisé les données Lidar fournies par le maître d'œuvre.

Un maillage de type TIN (triangulated irregular network) a été généré, avec une taille de maille d'environ 5 m. Cette taille est amplement suffisante pour le calcul du ruissellement. Elle est trop grossière pour un calcul hydraulique précis au niveau de la plateforme sur laquelle est bâtie la G1.

- Pour la crue, nous avons considéré qu'elle est consécutive à une pluie de projet de durée $d = 1 \text{ h}$ de période de retour $T = 100 \text{ ans}$, avec un cumul de 37 mm selon le tableau 1.9. Le modèle a tourné pour simuler ce qui se passait sur une durée de 15 000 s.

2. Cea, L., and E. Bladé, A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications, *Water Resources Research*, 51, 5464-5486, 2015.

- L'état initial du lit est sec. Aucune infiltration n'est prise en compte.
- Aucun ouvrage hydraulique n'est pris en compte.
- Des calculs de sensibilité ont été menés en faisant varier d et I .

4.5.2 Résultats du calcul

La figure 4.5 montre l'hydrogramme de la Fiolaz au niveau de la gare G1. Le débit de pointe est rapidement atteint (en moins d'une heure). Il fluctue entre 31 et 14 m³/s. La valeur représentative est

$$Q_p = 17 \text{ m}^3/\text{s}.$$

À titre de comparaison on a reporté sur la figure 4.5 la crue générée par une pluie de 47 mm en 2 h (courbe en tireté), et la crue décennale consécutive à une pluie de 28 mm en 1 h (courbe en pointillé rouge).

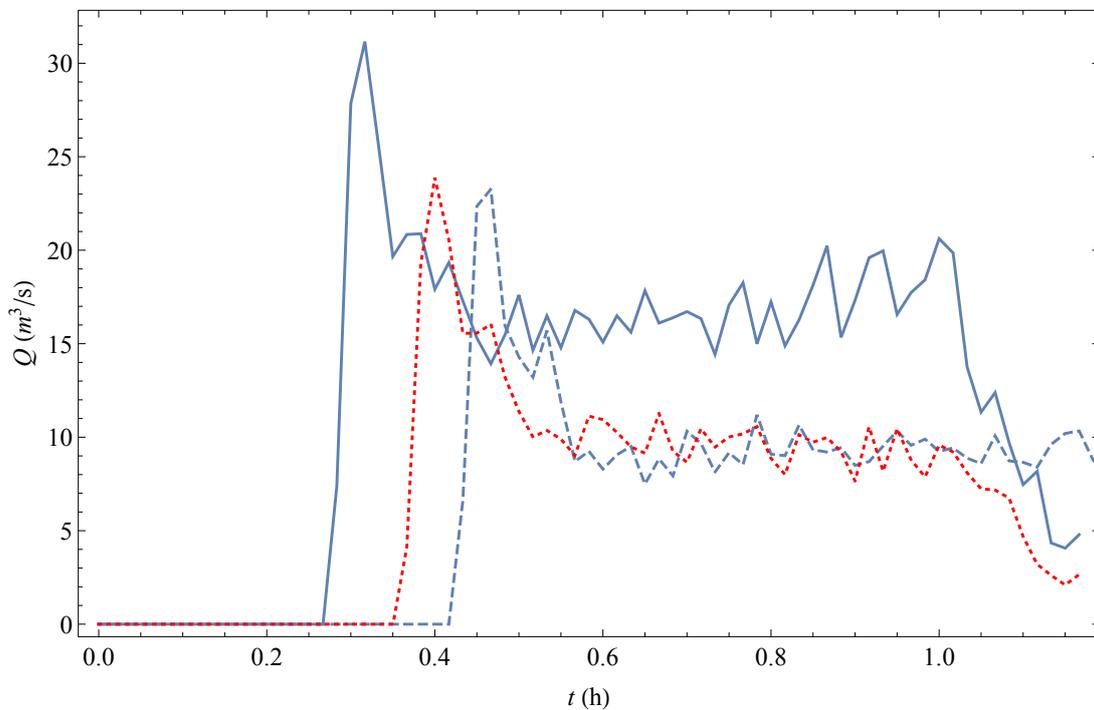


Figure 4.5 : variation du débit au cours du temps pour la période de retour $T = 100$ ans au niveau de la gare G1 (trait continu, paramètres $P = 37$ mm, $I = 37$ mm/h, $d = 1$ h, $T = 100$ ans). Trait discontinu : paramètres $P = 47$ mm, $I = 24$ mm/h, $d = 2$ h, $T = 100$ ans. Trait pointillé : paramètres $P = 28$ mm, $I = 28$ mm/h, $d = 1$ h, $T = 10$ ans.

On peut en déduire une carte d'aléa en considérant les couples (hauteur h , vitesse u) [guide méthodologique PPRI, p. 55]. La carte 4.6 montre que compte tenu du débit d'eau $q = uh$ (par unité de largeur) dans le lit de la Fiolaz, l'aléa hydraulique est considéré comme d'intensité fort (sans grande surprise).

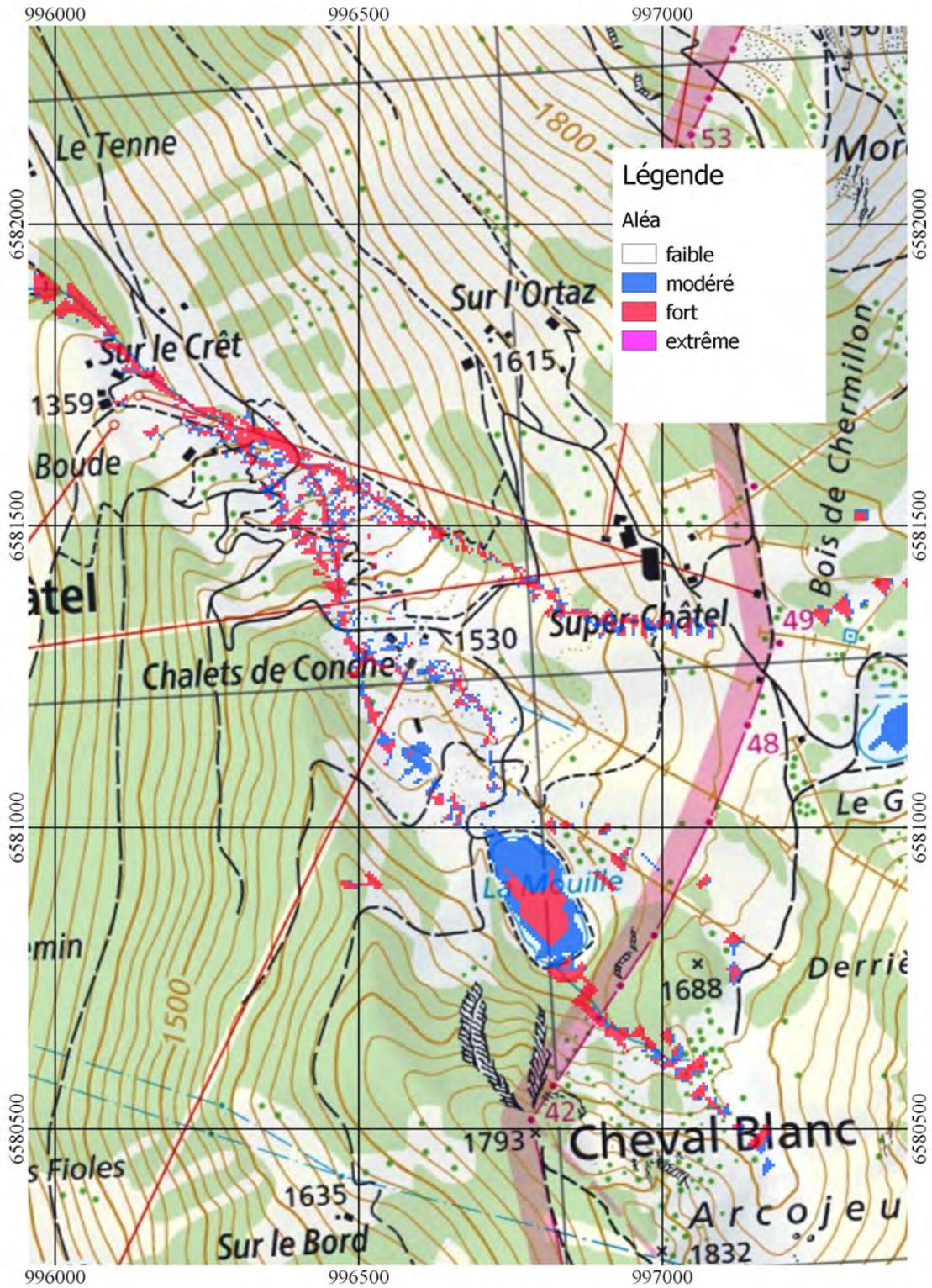


Figure 4.6 : zonage de l'aléa par couplage des valeurs q et h .

4.6 Synthèse

4.6.1 Crue de projet

En utilisant deux approches différentes, nous sommes arrivés à des estimations concordantes des débits (l'écart étant dans la marge d'incertitude) :

- approche hydrologique : $Q_p = 3 \text{ m}^3/\text{s}$ pour $T = 10$ ans et $Q_p = 7 \text{ m}^3/\text{s}$ pour $T = 100$ ans ;
- approche hydraulique : $Q_p = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ pour $T = 10$ ans et $Q_p = 17 \text{ m}^3/\text{s}$ pour $T = 100$ ans.

On note ici l'incertitude considérable avec des écarts d'un facteur 2 à 3. Cette incertitude est communément observée pour les bassins-versants de montagne. Un débit $Q_p = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ nous donnerait un débit spécifique de $4,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$, qui nous semble élevé pour un bassin-versant végétalisé à pente douce. Nous prenons donc comme débits de projet : $Q_p = 3 \text{ m}^3/\text{s}$ pour $T = 10$ ans et $Q_p = 7 \text{ m}^3/\text{s}$ pour $T = 100$ ans.

À titre de comparaison, la note de calcul hydraulique produite par le bureau Hydrétudes donnait un débit liquide décennal $Q_{10} = 2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ et centennal $Q_{100} = 4,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Leurs valeurs sont inférieures, mais on reste dans la marge d'incertitude de ce type de méthode.

4.6.2 Risque sur le TSD

La ligne du TSD n'est pas concernée par un risque torrentiel hormis dans la traversée du torrent de la Fiolaz. La gare G1 est située sur un promontoire au lieu-dit « sur le Crêt » (voir photographies 4.7). Elle est l'abri des débordements, même avec des débits de plus de $20 \text{ m}^3/\text{s}$.

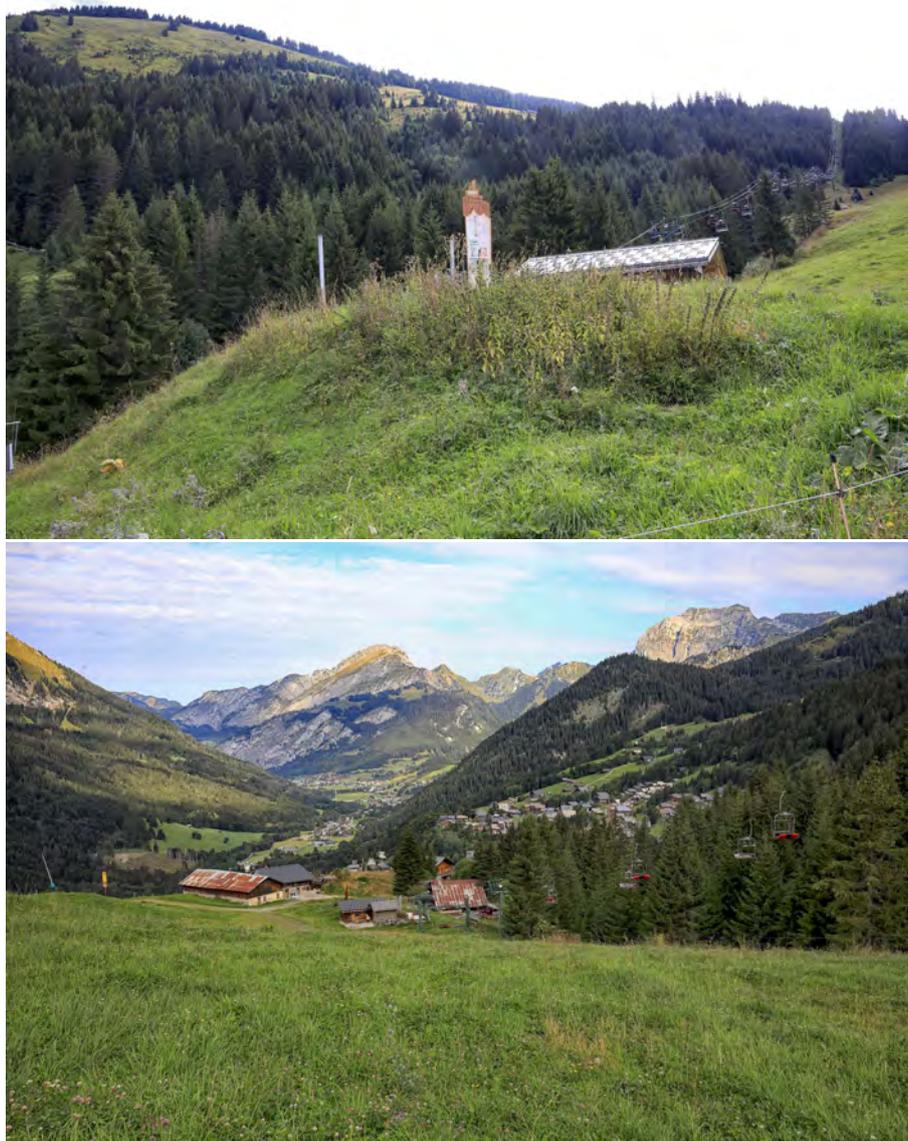


Figure 4.7 : vues sur l'actuelle gare G1 du TSD de Conche depuis l'amont et l'aval.

Synthèse

L'étude conclut à un risque modéré sur le projet de TSD de Conche :

- le projet n'est pas concerné par le risque torrentiel hormis dans la traversée du torrent de la Fiolaz ;
- un risque d'avalanches concerne la partie inférieure de la ligne. Les gares ne sont pas concernées jusqu'à des périodes de retour $T \sim 100$ ans. On ne peut pas exclure que pour des phénomènes plus rares, la gare G1 puisse être touchée par des langues d'avalanches et un effet de souffle.

Les tableaux des figures 5.1 et 5.2 fournissent les efforts d'avalanche (nous avons reporté la borne supérieure de la pression cinétique ou de la poussée hydrostatique), les épaisseurs moyennes de l'avalanche contre le pylône, les directions de sollicitation (mais ne fournit pas les valeurs de souffle, le souffle étant jugé négligeable) selon la position le long de la ligne et pour deux périodes de retour :

- avalanches rares de période de retour 30 ans : il s'agit d'avalanches de grande ampleur qui en moyenne ont 1/30, soit environ 3 %, de « chances » de se produire par an. D'après l'analyse statistique des données de Châtel, l'épaisseur maximale du manteau neigeux est 300 cm (précision de l'estimation jugée bonne car déjà atteinte par le passé). Les valeurs caractérisant l'avalanche sont reportées sur le tableau de la figure 5.1 ;
- avalanches exceptionnelles de période de retour 100 ans : il s'agit d'avalanches de très grande ampleur qui en moyenne ont 1/100, soit environ 1 %, de « chances » de se produire par an. L'épaisseur maximale du manteau neigeux est 350 cm (avec une incertitude grande). Les valeurs caractérisant l'avalanche sont reportées sur le tableau de la figure 5.2.

Ces tableaux ne fournissent pas les efforts dus à de la neige en glissement (que cela soit de la reptation ou des avalanches de glissement). Ces efforts correspondent à des phénomènes de glissement de forte intensité comme on a pu les observer en 2012 et 2014 à Saint-François-Longchamp, en 2013 à Cauterets. La fréquence de tels phénomènes est inconnue, et leur calcul reste malaisé.

► Pour plus d'informations sur les grandeurs employées ici, télécharger le document

www.toraval.fr/telec/addendum.pdf.

Toraval Ingénieurs-Conseils

Projet : TSD Conches

Profil généré par Vulnex 4.0 (1998–2018)

Date : 03/09/2018

Réf. : DCE TS Conches

Sources : AVAC 2.7

Système de coordonnées : RGF93

Position G1 x = 996135 y = 6581721

Position G2 x = 997357 y = 6581720

Hypothèses de calcul :

Période de retour considérée : 30 ans

Épaisseur de neige au sol : 300 cm

Type d'avalanches : coulante

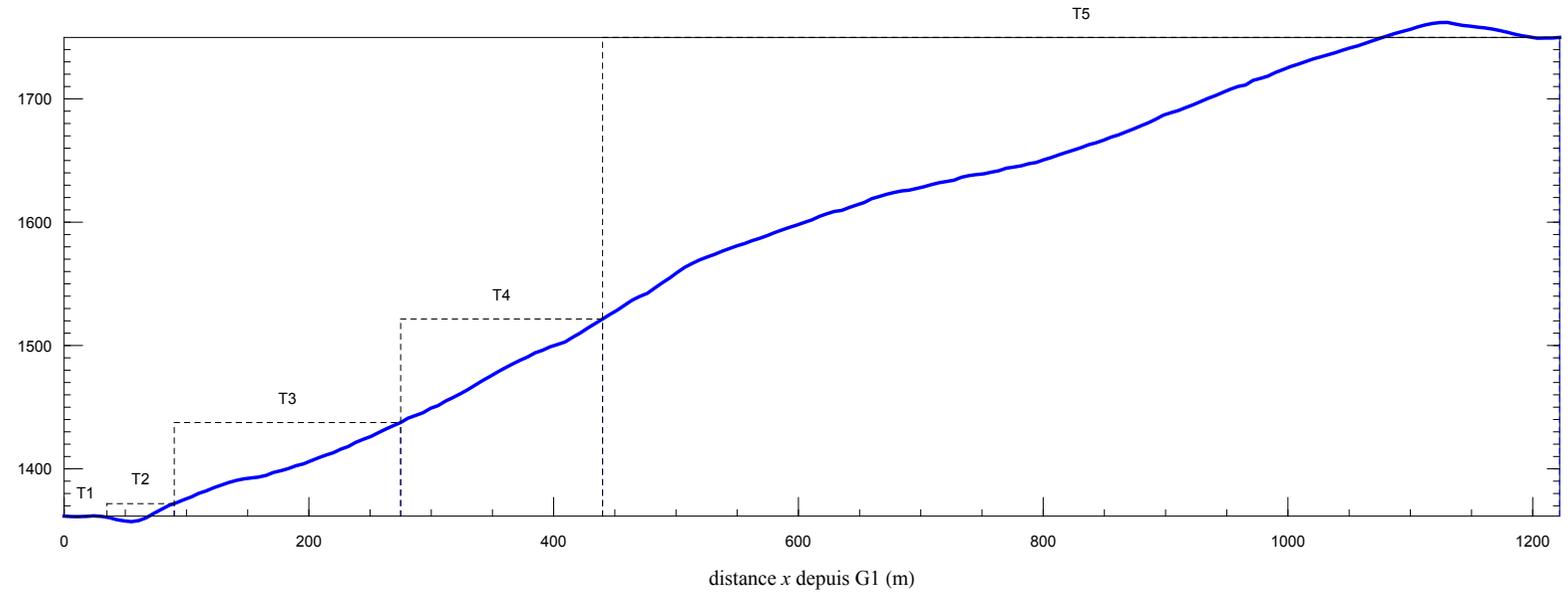
Origine des x : sortie de la gare aval

Incertitude sur les épaisseurs au sol : ± 40 cm

Incertitude sur les pressions : ± 5 kPa

Incertitude sur les hauteurs : ± 40 cm

Incertitude sur les directions : ± 20°



Terrain	Altitude (m)	1362	1361	1372	1438	1521	1750
	Dist. horiz. cum. (m)	35	90	275	440	1222	
Efforts	Pression (kPa)	0	20	30	30	0	
	Épaisseur (m)	0.	2.5	1.5	1.3	0.	
	Direction (°)	0	0	20	25	0	
	Souffle (kPa)	0	0	0	0	0	

Figure 5.1 : avalanches rares pour le TSD ($T \sim 30$ ans).

Toraval Ingénieurs-Conseils

Projet : TSD Conches

Profil généré par Vulnex 4.0 (1998–2018)

Date : 03/09/2018

Réf. : DCE TS Conches

Sources : AVAC 2.7

Système de coordonnées : RGF93

Position G1 x = 996135 y = 6581721

Position G2 x = 997357 y = 6581720

Hypothèses de calcul :

Période de retour considérée : 100 ans

Épaisseur de neige au sol : 350 cm

Type d'avalanches : coulante

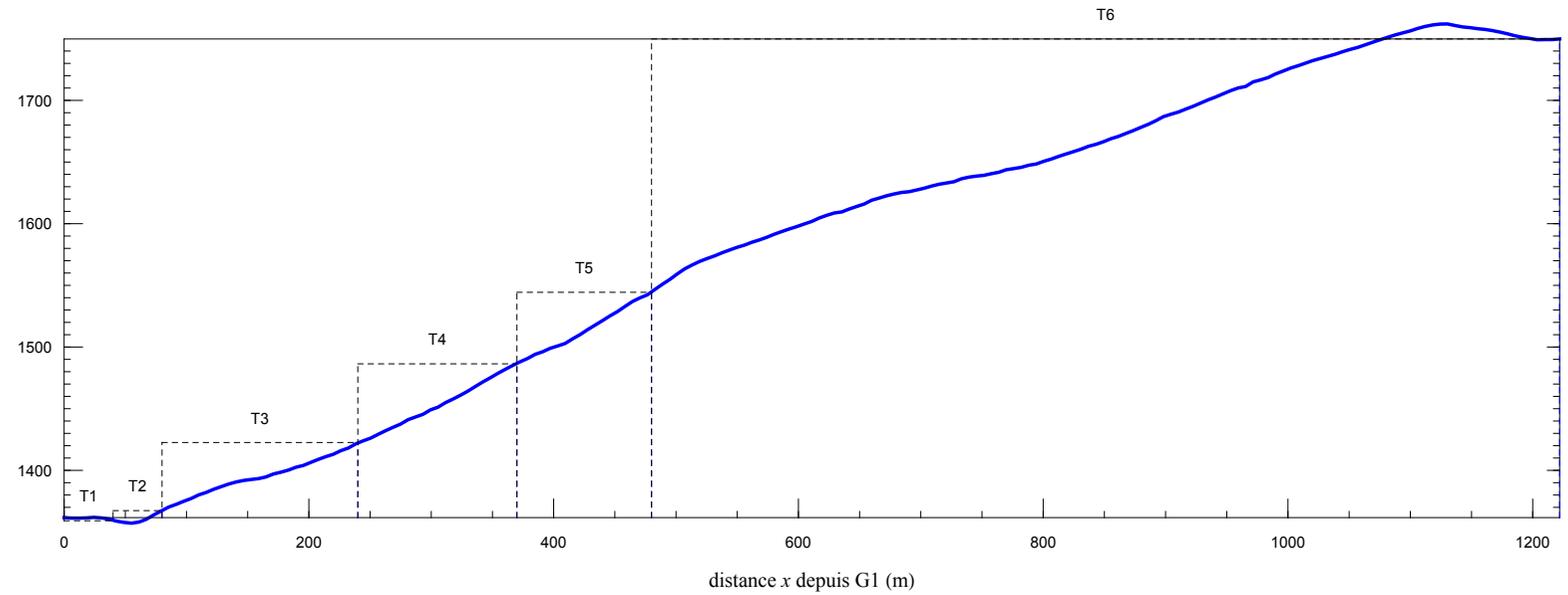
Origine des x : sortie de la gare aval

Incertitude sur les épaisseurs au sol : ± 40 cm

Incertitude sur les pressions : ± 5 kPa

Incertitude sur les hauteurs : ± 50 cm

Incertitude sur les directions : ± 20°



Terrain	Altitude (m)	1382	1359	1367		1423		1466		1544		1750
	Dist. horiz. cum. (m)		40	80		240		370		480		1222
Efforts	Pression (kPa)	20	30		30		65		50		0	
	Épaisseur (m)	1.5	2.5		1.5		1.2		1.2		0.	
	Direction (°)	25	0		20		25		30		0	
	Souffle (kPa)	20	20		15		15		15		0	

Figure 5.2 : avalanches exceptionnelles pour le TSD ($T \sim 100$ ans).

Cette étude a été réalisée par Toraval groupement d'ingénieurs-conseils.



<http://www.toraval.fr>

<http://www.toraval.ch>

Toraval Suisse : Chemin des Chardonnerets 13, CH-1008 Prilly

Toraval France : Les Favrets, F-73 400 Héry-sur-Ugine

- chargés d'étude :
 - Prof. Dr Ing. Christophe Ancey (ancey@toraval.ch)
 - Vincent Bain (bain@toraval.fr)
- commanditaire de l'étude : SAEM Sports et Tourisme
- maîtrise d'œuvre : CNA
- le corps de ce rapport contient 65 pages.
- pièces annexées : site web

<http://www.toraval.fr/projet/superchatel/>

(mode de passe @chatel#).