

# Formation de laves torrentielles en cas de rupture de barrage (annexe pièce rupture de digue)

Cette note a pour but d'estimer le risque de formation d'une lave torrentielle en cas de rupture du barrage de Forcle, de propagation vers la zone à enjeux.

## **1 Définition et caractérisation du phénomène lave torrentielle**

Avant d'évoquer le risque de formation d'une lave torrentielle en cas d'une rupture brutale du barrage de Forcle, il est proposé une rapide définition et caractérisation du phénomène de laves torrentielles.

### ➤ Définition

« Les laves torrentielles sont des coulées boueuses et rocailleuses » (Torrent et rivières de montagne). D'après Bardou (2002), les laves torrentielles sont « des écoulements subaériens granulaires lubrifiés, d'apparence cinématiquement monophasique ».

### ➤ Formation et propagation

**Les laves torrentielles se forment dans les lits à forte pente dans les secteurs où l'alimentation en matériaux permet la création d'un mélange homogène d'eau et de matériaux.**

Suivant la littérature on trouve des ratios sédiments/ eau variables mais toujours très importants de [3-5] à [2-10]. Par exemple, pour un débit d'eau de 1 000 m<sup>3</sup>/s, le débit de matériaux mis en mouvement est de 2 à 10 000 m<sup>3</sup>/s !

Les écoulements des laves torrentielles sont fortement transitoires. Il se présente le plus souvent sous forme de bouffées successives d'un à quelques mètres de hauteur avec des vitesses de propagation de 1 à 15 m/s (en contexte alpin).

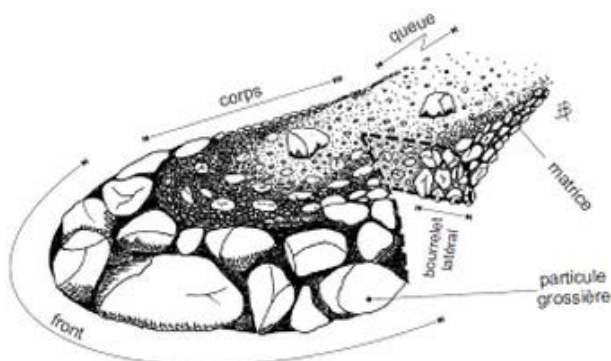
Les laves torrentielles peuvent être déclenchées par 4 grands mécanismes de formation :

- Apports solides massifs du chenal torrentiel : glissement de terrain (alimentation ponctuelle), érosion de berges (alimentation linéique),
- Apports solides massifs du bassin versant (alimentation surfacique),
- Déstabilisation du lit associée à d'autres phénomènes mais pouvant apporter des volumes de matériaux conséquents,
- Rupture d'un barrage naturel sur un torrent.

➤ Structure

On considère généralement que les laves présentent la structure suivante (cf. schéma ci-après) :

- Un **front** (ou bourrelet frontal) constitué des plus gros blocs mais également de « corps étrangers » tels que des arbres, des morceaux d'ouvrages. La section du front est très importante. Le front est poussé par le corps de la coulée.
- Un **corps** d'aspect généralement boueux. Cette partie de la bouffée constitue le moteur et l'essentiel du volume.
- De **bourrelets latéraux** en parallèle du corps de la lave d'aspect relativement similaire à celui du front. Ils sont constitués pour partie d'éléments du front.
- Une **queue de coulée** caractérisée par un passage progressif vers un écoulement moins concentré (charriage hyper-concentré). La section d'écoulement est nettement réduite.



**Schéma d'une bouffée de lave torrentielle (Bardou, 2002)**

**(Source : Torrent et rivière de montagne : dynamique et aménagements - 2013)**



**Front de lave (Photo : IRSTEA)**



**Front de lave et corps de lave (Extraits vidéo – torrent Illgraben en Suisse)**

### ➤ Caractéristiques des écoulements

Dans le cas des laves torrentielles boueuses, la loi de comportement HERSCHEL & BULKLEY permet d'estimer les hauteurs et vitesses de laves torrentielles du corps de lave :

$$\tau = \tau_c + K * \frac{\partial v^{1/3}}{\partial y} \quad \text{pour } \frac{\partial v}{\partial y} \neq 0$$

Avec :

- $\tau$  : contrainte de cisaillement (N/m<sup>2</sup>),
- $\tau_c$  : seuil de contrainte dépendant du matériau (N/m<sup>2</sup>),
- K : coefficient caractéristique du matériau,
- v : vitesse de la lave (m/s),
- y : distance depuis le fond (m).

De cette loi de comportement, la vitesse d'écoulement de la lave (et donc le débit) peut être estimé à l'aide de la formule de COUSSOT (1992) :

$$U = \left(\frac{\tau_c}{K}\right)^3 * h * \left[\frac{1}{\Delta} * \left(\frac{\rho g R_H * \sin i}{\tau_c} - 1\right)\right]^{10/3}$$

Avec :

- U : vitesse moyenne débitante (m/s), h : l'épaisseur d'écoulement(m)
- $\tau_c$  : seuil de contrainte dépendant du matériau (N/m<sup>2</sup>),
- K : coefficient caractéristique du matériau,
- $\Delta$  : coefficient correcteur empirique lié à la géométrie du canal :
- $\rho$  : masse volumique (kg/m<sup>3</sup>), / g : constante gravitationnelle (N.m<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>),
- $R_H$  : rayon hydraulique (m), / i : angle de la pente

Il est important de noter que les laves torrentielles présentent des lois de comportement très différentes de celles des fluides newtoniens (comme l'eau par exemple). La contrainte de cisaillement n'est pas directement proportionnelle au gradient de vitesse. Il existe pour les laves une contrainte de cisaillement nécessaire pour que le mouvement débute. Ainsi, on peut observer une hauteur de laves importantes sur des pentes sans mise en mouvement.

Les équations présentées précédemment sont valables dans le cas d'un régime uniforme pour des écoulements laminaires. Dans le cas d'une lave générée suite à une rupture de barrage, les écoulements ne sont pas uniformes et très probablement turbulents. Les équations ne sont plus valables. Une approche empirique dans ce cas est proposée. A partir d'une vitesse de lave issue des retours d'expérience et de la littérature, il est estimé la section nécessaire au débit recherché.

## **2 Risque de formation de laves torrentielles**

Le risque de formation de laves torrentielles a été étudié en grande majorité dans le cas de déclenchement naturel suite à des événements hydrologiques.

Le cas d'un déclenchement suite à la rupture d'un barrage ou retenue d'altitude est bien moins documenté et se base en grande partie sur les phénomènes connus naturels. Pour la suite, nous retiendrons les sources suivantes pour l'analyse :

- [1] Retenues d'altitude – CEMAGREF – 2009
- [2] Torrents et rivières de montagne : dynamique et aménagement – 2013
- [3] Projet transfrontalier Italie- France : RISBA (Risques des barrages) – ALCOTRA pour l'action 3.2 : Etude de l'onde de rupture d'un barrage incluant le transport solide et la potentialité de formation de laves torrentielles – CEMAGREF Grenoble – novembre 2015

**On retiendra un mode de formation des laves torrentielle en cas de rupture d'une retenue essentiellement par érosion intense du chenal préexistant ou d'un versant situé en aval de la retenue.** La chenalisation par concentration des écoulements et non dissipation par étalement latéral favorise la formation de phénomène de type laves torrentielles.

Pour la retenue de Forcle, une brèche de 43 m de large telle que présentée dans l'étude de rupture de digue représente un volume de matériaux de l'ordre de 40 à 50 000 m<sup>3</sup>. Considérant un ratio de 1 à 2 sur les volumes, une lave torrentielle de 100 000 m<sup>3</sup> pourrait être déclenchée par la rupture de la digue. L'étude doit ensuite sur la possibilité « d'enrichissement de la lave » et de sa propagation. Ces volumes sont bien trop faibles au regard des volumes d'eau libérés (environ 300 000 m<sup>3</sup> au total) pour déclencher une lave torrentielle de grande ampleur. L'étude doit être portée sur la géomorphologie de la vallée en aval de la retenue pour évaluer un chargement potentiel.

## 2.1 Facteurs de déclenchement

En cas de laves torrentielles faisant suite à des érosions, les facteurs de déclenchement identifiés sont les suivants :

- La pente nécessaire à la fois au phénomène de formation mais aussi de propagation jusqu'à la zone à enjeux.
- Présence de matériaux érodables en aval de la retenue/ barrage et nature des matériaux érodables.
- Conditions hydrauliques liées à la rupture (instantanée ou progressive, volumes libérés).

### ➤ Pente de déclenchement

La pente de déclenchement de laves torrentielles d'origine hydrologiques requiert des pentes suffisamment fortes (16-17 % selon [3] voir 30 % selon [1] et [2]).

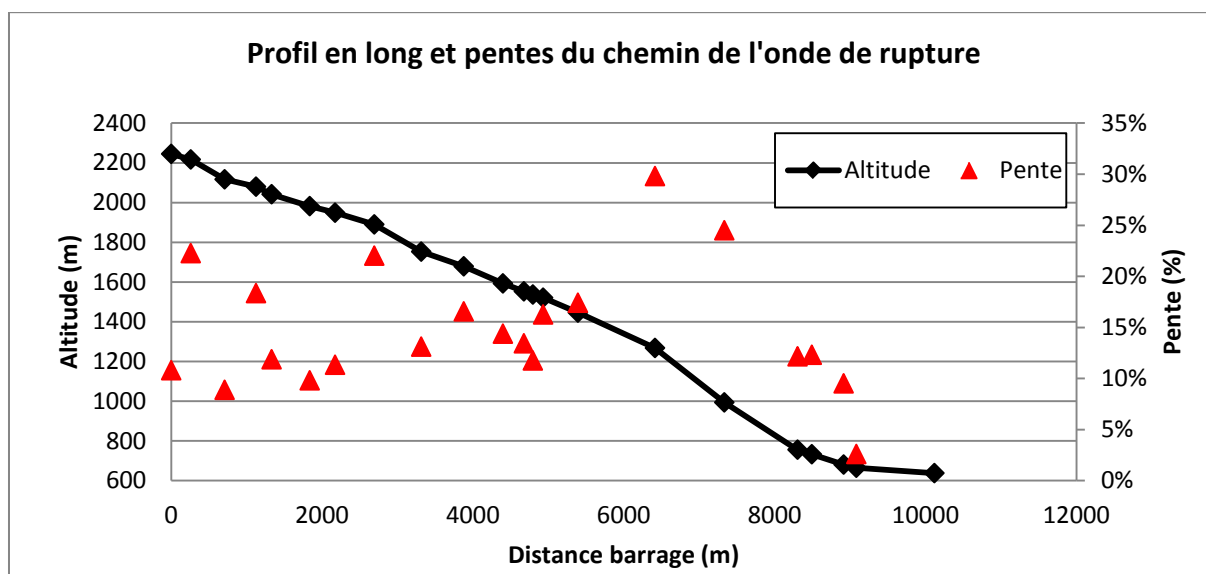
En aval de la retenue de Forcle, la pente en long est de l'ordre de 15% en moyenne et jusqu'à 22% localement. La pente devient plus prononcée au niveau du profil PT2 avec une pente moyenne à 22 % et localement 34 %. La pente du lit du torrent devient moins forte entre Belle Plagne et Plagne Bellecôte, de l'ordre d'une dizaine de pourcents.

Profil	Distance (m)	Altitude (m)	Pente moyenne (%)	Pente maximale locale (%)
PT1	0	2245	11%	22
PT2	259	2217	22%	34
PT3	708	2117	9%	30
PT4	1124	2080	18%	17
PT5	1331	2042	12%	20
PT6	1836	1982	10%	10
PT7	2172	1949	11%	50
PT8	2692	1890	22%	50
PT9	3314	1753	13%	20

Belle Plagne  
 ↓  
 Plagne Bellecôte  
 ↓

	Profil	Distance (m)	Altitude (m)	Pente moyenne (%)	Pente maximale locale (%)	
La Roche ↓	PT10	3878	1679	17%	20	
	PT11	4397	1593	14%	16	
	PT12	4675	1553	13%	11	
	PT13	4794	1537	12%	15	
	PT14	4930	1521	16%	23	
	PT15	5391	1446	17%	30	
	PT16	6413	1268	30%	60	
	PT17	7332	994	25%	50	
	Bonnegarde ↓	PT18	8303	756	12%	25
		PT19	8492	733	12%	13
Les Provagnes ↓	PT20	8914	681	10%	8	
	PT21	9082	665	3%	11	
	PT22	10117	638		0.5	

**La pente moyenne à la ligne  $i$  correspond à la pente  $PT_i$  et  $PT_{i+1}$**



**Au regard de ces éléments, la pente du versant à l'aval de la retenue de Forcle jusqu'à Belle Plagne apparaissent comme étant plutôt limitante à la formation de laves torrentielles.**

**Les pentes deviennent fortes dans les gorges du ruisseau de Bonnegarde et ne sont pas limitantes à la formation de laves. Cette zone est néanmoins éloignée du barrage.**

➤ Pente de propagation

Une fois que la lave torrentielle est formée, il est évalué la capacité de celle-ci à s'enrichir, à se propager en aval sur des zones à enjeux. Les pentes d'arrêt dans la littérature varient de 5 à 10 % avec une perte en intensité dès 10 à 15 %.

Au regard de ces éléments, on notera que sur le secteur Belle Plagne – Plagne Bellecôte, la propagation n'est pas certaine. Par ailleurs, le secteur de Plagne Bellecôte constitue une zone d'arrêt en cas de laves torrentielles avec des pentes plus faibles et des constructions qui referment la vallée avec un effet « barrage ».

➤ Matériaux disponibles

Comme évoqué précédemment, les matériaux de la digue emportés en cas de rupture (brèche) représentent un volume de 50 000 m<sup>3</sup> et pourraient être associés à une lave de 100 000 m<sup>3</sup>.

En aval, un chargement (en eau et matériaux) pourrait s'envisager par érosion selon la disponibilité des matériaux. La méthode de Hungr (1984) permet l'obtention d'ordre de grandeur en fonction de la nature des matériaux, de la morphologie du chenal.

Pente (degrés)	Matériau du lit	Berges	Conditions de stabilité (avant événement)	Taux d'érodabilité $e$ (m <sup>3</sup> /m)
20-35	Roche-mère	Non érodable	Stable (quasi absence de matériaux mobilisables)	0-5
10-20	Fine couche de sédiments ou de sol meuble sur la roche-mère	Non érodable (roche-mère)	Stable	5-10
10-20	Couche meuble épaisse ou moraine	Plus de 5 m de haut	Stable	10-15
10-20	Couche meuble épaisse ou moraine	Plus de 5 m de haut	Pentes latérales stables	15-30
10-20	Couche meuble épaisse ou moraine	Plus de 20 m de haut	Pentes latérales potentiellement instables (glissements de berge)	Jusqu'à 200 (à considérer comme une source ponctuelle)

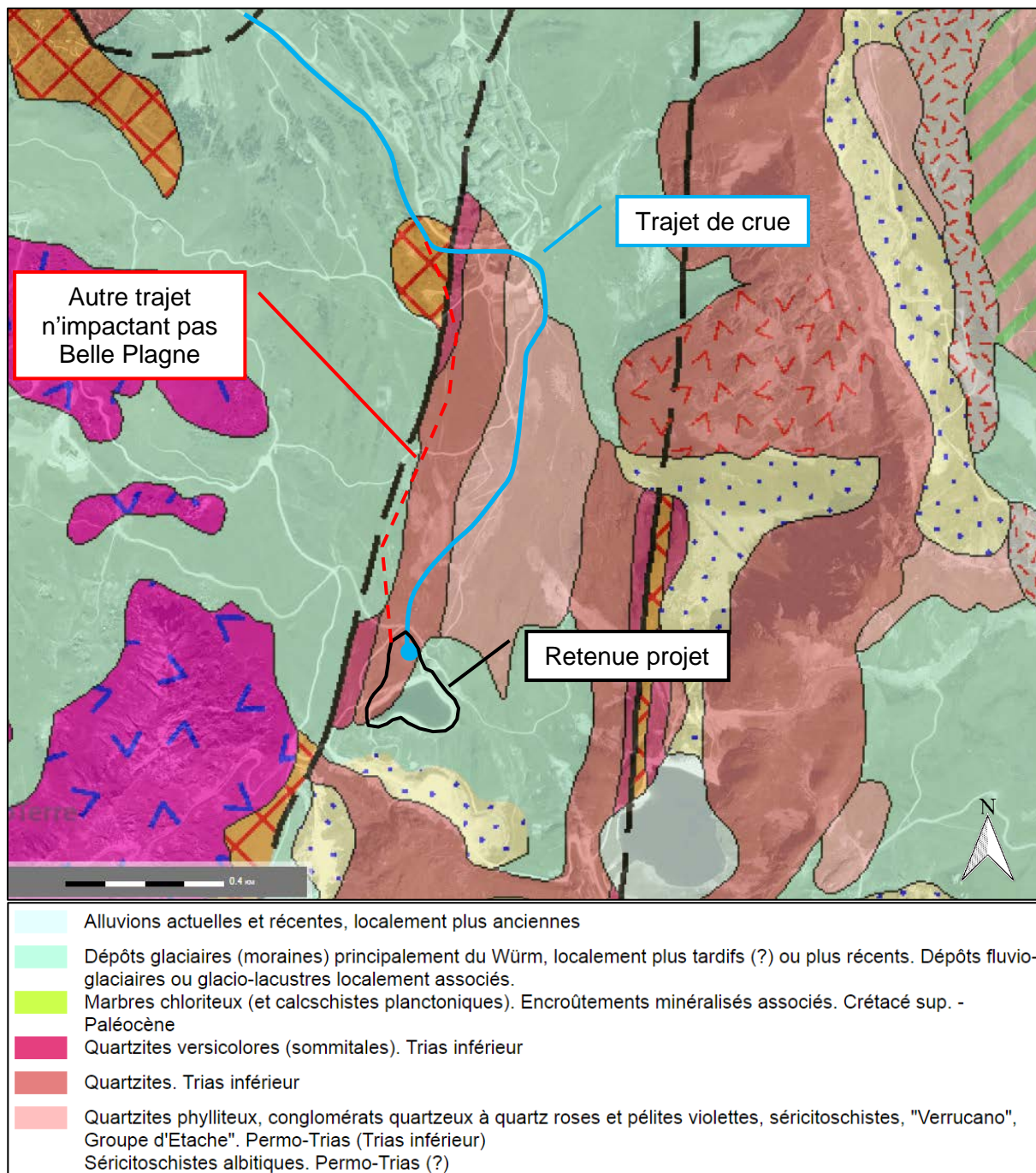
**Méthode empirique pour l'estimation du volume de matériau fourni par le chenal (d'après Hungr et al., 1984)**

L'étude géotechnique réalisée par SAGE a mis en évidence les terrains suivants sur la zone d'agrandissement (sans prise en compte de la couche de terre végétale) :

Formation géologique	Epaisseur (m)	Qualification de l'érodabilité des berges	Taux d'érodabilité théorique (m <sup>3</sup> /m)
Moraines sablo-limoneuses	0,2 à 2,2 m	Erodable	10-15
Quartzite altérées (graves et blocs à matrice sableuse)	0,1 à 3,0 m	Peu érodable à non érodable	5-10
Quartzite peu altérées	Non définie	Non érodable	0-5

Le long du trajet de la crue en cas de rupture, les terrains géologiques rencontrés jusqu'à BellePlagne sont des terrains quartzitiques qualifiés de peu érodables à non érodables selon

leur degré d'altération pour la majorité des scénarios de brèches. La carte ci-après montre en bleu le tracé retenu pour la modélisation de l'onde de rupture (scénario pour lequel BellePlagne peut être touché) et en rouge un scénario lié à une brèche plus à l'ouest. Entre BellePlagne et Bellecôte, les terrains sont des moraines glacières, matériaux érodables.



**Extrait de la carte géologique au 1/50 000 harmonisée sur fond orthophoto (Source : BRGM)**

Ci-après des exemples d'affouillement de plusieurs mètres dans des chenaux torrentiels suite au passage de laves.



***Exemples d'érosion de chenal en cas d'évènement torrentiel (source : Torrents et rivières de montagne)***

Pour se donner des ordres de grandeur, la formation d'un chenal en aval de la retenue avec un taux d'érodabilité de 5 à 10 m<sup>3</sup>/m dans les quartzites, le volume fourni par le chenal sur 1,3 km (distance retenue –BellePlagne) est de l'ordre de 10 000 m<sup>3</sup>.

En aval de BellePlagne, les écoulements se concentrent dans le thalweg de fond de vallée marqué. Le taux d'érodabilité passe à 30 m<sup>3</sup>/m (valeur haute) dans les moraines. Dans ces conditions les terrains pourraient fournir un volume de 30 000 m<sup>3</sup> (fourchette haute des fonds mobilisables).

Les matériaux et terrains mobilisables sur le chemin de l'onde de rupture représentent un volume de l'ordre de 90 000 m<sup>3</sup>, soit potentiellement (si les conditions de déclenchement et propagation sont réunies) une lave de 150 à 180 000 m<sup>3</sup>.



## 2.2 Risque de lave en cas de rupture de Forcle

L'analyse réalisée dans les paragraphes précédents met en avant les éléments suivants :

- En aval de la digue, le tronçon jusqu'à BellePlagne est peu structuré (pas de chenal torrentiel préférentiel), de pente modeste (globalement de l'ordre de 10 %). La formation d'une lave n'y est pas certaine. La formation d'une lave de grande ampleur l'est encore moins au regard des volumes disponibles (terrains quartzitiques).  
En définitive, une lave de 100 à 150 000 m<sup>3</sup> apparaît comme un ordre de grandeur maximal vraisemblable : 60 000 m<sup>3</sup> de matériaux dont 50 issus de la brèche).  
Sur ce tronçon, un phénomène de charriage torrentiel avec gros blocs est plus probable et prépondérant.
- Entre BellePlagne et Bellecôte, les écoulements sont concentrés dans un chenal marqué de pente en long de nouveau relativement faible pour la propagation d'une lave torrentielle (10 %). Des dépôts sont possibles (sous réserve de la formation d'une lave en amont).  
En cas de propagation (pas certaine), les terrains pourraient venir « grossir » la lave en apportant un volume de matériaux de l'ordre de 30 000 m<sup>3</sup>. Selon ces hypothèses, une lave d'au maximum 150 à 180 000 m<sup>3</sup> pourrait arriver à Bellecôte.
- Le front de neige de Bellecôte constitue en cas de formation de lave une zone d'arrêt privilégiée au regard de la configuration du site : vallée rétrécie et fermée par des immeubles.

	Longueur tronçon	Pente	Terrains rencontrés	Fourniture matériaux* (m <sup>3</sup> )	Risque formation de laves torrentielles
Brèche	-	-	Quartzites recouvertes de moraines	50 000 m <sup>3</sup>	Volume lave = 100 000 m <sup>3</sup> .
PT1-PT5 (BellePlagne)	1,3 km	10 %	Quartzites	10 000 m <sup>3</sup> Cumul : 60 000 m <sup>3</sup>	Pas certaine. Phénomène prépondérant : charriage torrentiel Volume lave potentiel = 100 à 150 000 m <sup>3</sup>
PT5-PT8 (BelleCôte)	800 m	10-12 %	Moraines glaciaires	30 000 m <sup>3</sup> Cumul : 90 000 m <sup>3</sup>	Pas certaine. Phénomène prépondérant : charriage torrentiel Volume lave potentiel = 150 à 180 000 m <sup>3</sup>
Front de neige Bellecôte	-	-	Moraines glaciaires		Zone de dépôt de matériaux et d'arrêt de lave en cas de formation.

\* la fourniture en matériaux (=chargement) est estimé considérant un taux d'érodabilité de 10 à 30 m<sup>3</sup>/m selon la nature des matériaux rencontrée (ordre de grandeur donné par la méthode d'Hungr).

**Au niveau de la retenue de Forcle, une rupture de la digue pourrait déclencher une lave torrentielle de 100 000 m<sup>3</sup>. En aval, par contre sa propagation n'est pas certaine au regard des pentes assez faibles (10 %).**

**Dans le cas où une propagation se ferait, les terrains en place (quartzites puis moraines) pourraient grossir cette lave de 150 à 180 000 m<sup>3</sup> au niveau de Bellecôte où les dépôts pourraient être massifs et atteindre plusieurs mètres au droit de la barre d'immeuble.**

**La formation d'une lave torrentielle qui atteindrait Bellecôte n'est pas certaine, pour autant il est clair que le transport solide est intense avec des débits pouvant aller jusqu'à une centaine de mètres cube par seconde (voir étude de rupture de digue) avec de gros blocs de plusieurs tonnes transportés.**

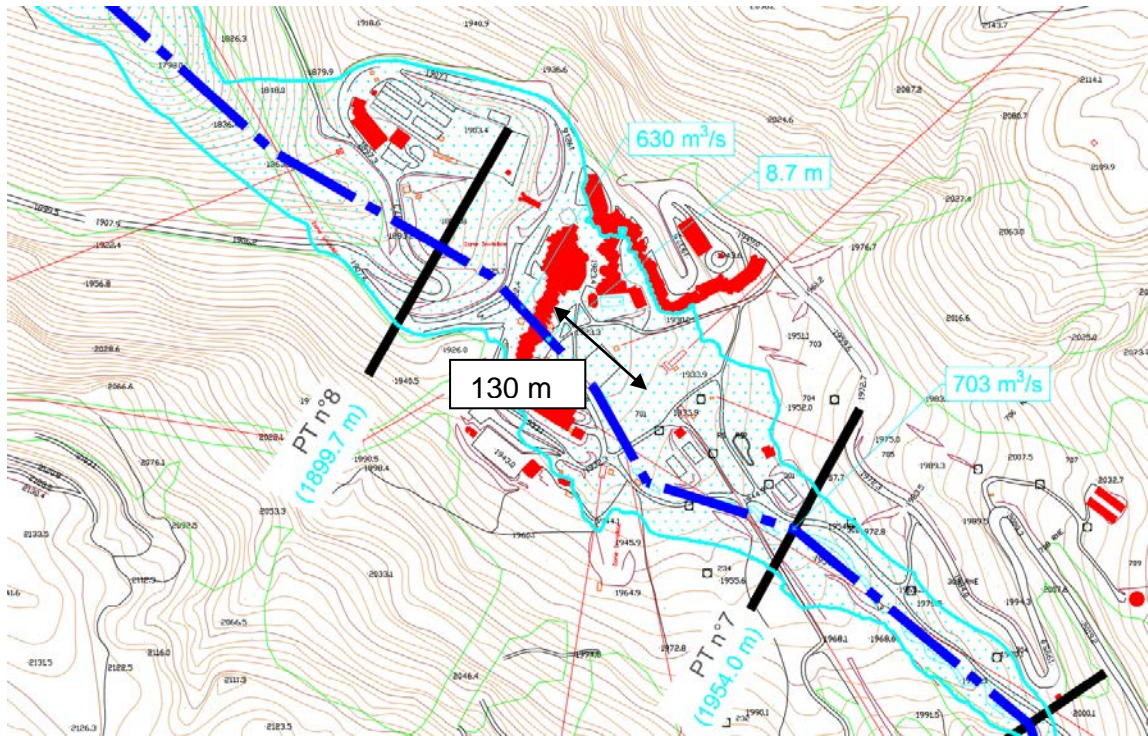
Afin de se rendre compte des potentiels impacts en cas de survenue d'un tel phénomène, il est proposé une cartographie du phénomène de plus grand ampleur. Pour cette simulation, il est fait abstraction des facteurs limitants à la formation de laves. Sont retenus les paramètres suivants :

- Volume lave : 150 à 180 000 m<sup>3</sup>
- Débit lave : 1400 à 1700 m<sup>3</sup>/s d'après la formule de Rickenmann (1999) :  
$$Q_{max} = 0,135 * V^{0.78}$$
- La loi d'écoulement des mélanges boueux ne peut être utilisé (pas de régime uniforme, écoulement non laminaire). Sous l'hypothèse d'un débit et d'une vitesse donnés, il est estimé la section d'écoulement nécessaire pour faire transiter le débit,
- Vitesse de propagation de la lave : 10 m/s dans la fourchette de ce qui est observé en secteur alpin.

La carte inondation qui en résulte est sensiblement identique à celle fournie dans la rupture de digue. Une surcôte de l'ordre du mètre est possible, voir plus localement en fonction des dépôts.

Au niveau du front de neige de Bellecôte, la situation est différente au regard du risque de dépôt massif. Pour se donner quelques ordres de grandeur le volume stocké sous la cote 1928 est de 75 000 m<sup>3</sup> par rapport au terrain naturel sur un linéaire de 130 ml.

Dans ces conditions, des dépôts plurimétriques seraient possibles au droit des bâtiments avec une surcôte importante sur la ligne d'eau.



**Extrait de la carte inondation rupture digue + crue millénaire (sans échelle)**

A ce scénario assez pessimiste, un scénario de dépôt de 2 à 3 m semble plus vraisemblable correspondant à un dépôt d'environ 30 000 m<sup>3</sup> sur le front de neige.