



GROUPE MÉCANIQUE DES ROCHES
L.EFFENDIANTZ

INTERREG III A

ACTION C : PROPAGATION

Proposition pour le rapport final

Chapitre 2 Description des méthodes numériques

2.1 Description des méthodes

2.1.2 Méthode CETE de Lyon

2.1.1.5 Hypothèses

Le CETE de Lyon a développé depuis une dizaine d'années une approche opérationnelle de la simulation de propagation des éboulements rocheux en contexte matériaux granulaires secs. Un autre modèle a été proposé dans le cadre d'un Doctorat (Rochet-Bouزيد, 2001). Il s'agit d'un modèle homogénéisé de type fluide prenant en compte les particularités de l'avalanche rocheuse, notamment les variations importantes de compacité dans l'éboulement. Le concept initial de l'outil "CETE de Lyon" est actuellement repris par la Société Rochet Consultants qui en assure les développements conceptuels et logiciels sous l'appellation EBMAS.

Dans la démarche de modélisation des éboulements, le critère mécanisme d'endommagement de la zone source n'est pas pris en compte. Les seuls éléments géotechniques pris en compte concernent la fracturation et le mécanisme de rupture dans la mesure où ils interviennent sur la géométrie de la niche d'arrachement et le mode de réalisation de l'éboulement (monophasé, pluriphasé, voire progressif).

EBMAS est un modèle à deux dimensions avec calcul des volumes par tranches selon des couloirs d'écoulement qui sont déterminés manuellement. La modélisation donne la forme du dépôt consécutif à un éboulement déterminé.

La détermination des volumes est réalisée à partir de plans photo-restitués de haute précision. Le volume en place des zones instables est calculé à partir de coupes sérieées établies suivant un réseau de profils de discrétisation du versant, en appliquant une méthode d'approximation pyramidale. Cette méthode d'approximation permet une prise en compte continue des variations de surface entre les sections voisines. Les surfaces, délimitées par la surface topographique d'une part et les limites inférieure et arrière d'autre part, sont calculées pour chaque profil. Les profils ne sont pas nécessairement rectilignes, ce qui permet la prise en compte des particularités structurales et morphologiques du terrain.

2.1.1.6 Equations, paramètres, mode de résolution....

a) *Processus de calcul*

Le processus de calcul comporte les étapes suivantes :

- constitution d'un réseau de ligne d'écoulement de l'éboulement. Le processus est itératif et part d'un tracé approché défini à partir de la morphologie du versant à l'aval de la zone de départ. Ce tracé est modifié éventuellement en fonction de la morphologie de l'éboulis produit (notamment des pentes maximales et de l'obliquité des lignes d'écoulement dans les zones latérales du dépôt). L'ensemble du processus de simulation est repris après chaque itération sur le tracé du réseau d'écoulement.
- détermination du diagramme de répartition des flux. Ce diagramme définit la répartition transversale des flux d'éboulis associés aux canaux d'écoulement centrés sur chaque profil de calcul, dont l'alimentation en tête est définie par le volume de la tranche correspondante de la zone instable. Un processus de calcul permet l'ajustement sur ces valeurs d'un diagramme continu définissant les valeurs des flux prises en compte pour les différents profils de calcul
- calculs de simulation pour chaque profil de calcul correspondant aux différents canaux d'écoulement. Le processus de calcul est conduit par incréments successifs du flux d'éboulis et modifications associées de la morphologie du versant dans le canal considéré
- restitution de la géométrie finale du versant par intégration des différents profils de calcul et raccordement latéral de l'éboulis formé à la partie non modifiée du versant
- contrôle de la morphologie des zones latérales (pente maximale et obliquité), modification éventuelle du tracé du réseau d'écoulement et itération suivante avec le tracé modifié ou clôture de la simulation.

b) *Modèle de simulation*

1. Rappel des principaux types d'éboulements -Modes de propagation

D'une manière générale la définition du domaine des éboulements rocheux peut être étendue à l'ensemble des phénomènes de déplacement rapide de masses rocheuses mises en mouvement à l'issue d'un processus de rupture. Contrairement aux phases de rupture et de déformation en place, l'énergie cinétique du système constitué par la masse en mouvement devient prépondérante. Celui-ci entre dans une phase dynamique que l'on peut définir par le terme général "d'écoulement rocheux".

Les écoulements rocheux traduisent une évolution naturelle avec diminution rapide de l'énergie potentielle du système. La dissipation d'énergie met en jeu différents phénomènes (fragmentation, déformation, déplacement, vibration, dissipation thermique. ...) dont l'importance relative peut être très différente suivant les cas. Le volume total de la masse en mouvement constitue un paramètre déterminant. On peut définir une classification des éboulements rocheux en quatre types principaux, liés au volume des masses en mouvement, relevant de mécanismes de propagation différents :

- Chutes de pierres et de blocs isolés
- Eboulements
- Eboulements en masse
- Déplacements en masse

Du point de vue des mécanismes mis en jeu, cette classification repose sur l'importance et la nature des interactions qui se développent au sein de la masse en mouvement et au contact du substratum.

Pour les deux premiers types d'éboulements on définit un mécanisme de propagation en mode indépendant caractérisé par un niveau d'interaction nul ou faible entre les éléments en mouvement. Le niveau d'interaction devient très important pour les éboulements du troisième type pour lesquels on définit un mode de propagation en masse.

2. Propagation des éboulements à interactions fortes - Effet de masse

L'influence du volume total mis en jeu dans un éboulement en masse sur les conditions de propagation de celui-ci est déterminante. Les études de cas effectuées sur les éboulements rapides et catastrophiques rapportées par la bibliographie, montrent une forte réduction de la dissipation d'énergie au sein de l'éboulement lorsque le volume de celui-ci augmente, traduisant un phénomène de "fluidisation" croissant avec le volume.

Les graphiques des figures 1 et 2 montrent une corrélation forte entre la réduction du frottement apparent d'un éboulement en masse et l'augmentation du volume mis en jeu. On notera que le graphe est exprimé en échelle logarithmique et que les données analysées mettent en évidence une forte dispersion.

3. Concept de modélisation

Des modèles de simulation ont été mis au point et sont opérationnels dans le domaine des éboulements classiques. La transition entre les différents modes de propagation étant progressive en fonction du volume mis en jeu, il est apparu judicieux de rechercher une approche homogène de ce problème.

La démarche développée regroupe de manière continue les différents modes de propagation dans un modèle unique, paramétrable en fonction du volume de l'éboulement. Ce principe général est mis en oeuvre par extension du concept de fonction de transfert qui caractérise la dissipation d'énergie dans le cas de la propagation d'un bloc élémentaire en mode indépendant (mécanisme de référence d'un éboulement classique).

La démarche comporte trois volets :

La définition du modèle de référence relatif aux éboulements classiques dans lequel la dissipation d'énergie au cours de la propagation est décrite au moyen de fonctions de transfert (caractérisant la dissipation d'énergie cinétique lors des impacts successifs).

La définition d'un modèle incrémental applicable au cas des éboulements régressifs. Il s'agit d'un premier niveau d'extension du modèle de référence ci-dessus intégrant la modification de la morphologie du versant par le développement de l'éboulement lui-même, ou les phases successives de celui-ci. Ceci implique une actualisation continue de la topographie au cours du processus de calcul. Celle-ci est effectuée par un module de calcul comportant un modèle de génération de la courbe d'étalement des matériaux caractérisée par la pente locale $P(x)$ sous la forme :

$$P(x) = f(P_0, P_t, \alpha_1, \Delta V, x)$$

avec	P_0	pente de la courbe limite d'étalement sur une surface horizontale,
	P_t	pente topographique locale,
	α_1	pente limite des éboulis
	ΔV	incrément de volume du calcul
	x	distance à la limite d'extension

Le calcul est conduit par incréments de volume successifs, en couplant le modèle de propagation définissant la limite d'extension et le modèle d'étalement générant la topographie résultante.

Par référence à des observations de terrains et des essais de laboratoire, on retient une expression de P_0 de la forme :

$$P(x) = Ax^b \text{ avec } |P_0| \leq \alpha 1$$

où A dépend du volume ΔV
 b est une constante comprise entre 0.5 et 1.

La définition d'un modèle d'effet de masse prenant en compte la réduction de la dissipation d'énergie au sein de l'éboulement en fonction de l'augmentation de volume de celui-ci.

Le modèle incrémental précédent est étendu au cas des éboulements en masse. Il considère essentiellement la propagation des matériaux déterminant la limite de propagation. Il suppose que les échanges d'énergie dans la partie externe de l'éboulement ne s'effectuent plus au contact d'un substratum fixe mais au contact d'une zone plus interne elle-même en mouvement. Les transferts d'énergie s'expriment en fonction des vitesses relatives qui sont inférieures aux vitesses absolues des éléments, déterminant une plus faible dissipation d'énergie dans la zone externe.

Exprimées dans un repère fixe et en fonction des vitesses absolues, les fonctions de transfert apparaissent comme des fonctions croissantes de la masse en mouvement :

$$\Psi_i = f_i(\Psi_{0i}, \Phi(V)) \quad i = (n, g, \rho) \quad \text{expression dans laquelle :}$$

Ψ_{0i} représente les valeurs correspondantes des fonctions de transfert en mode indépendant,

$\Phi(V)$ est une fonction (comprise entre 0 et 1) traduisant l'influence du volume total V de la masse en mouvement sur la variation des fonctions de transfert.

L'existence de corrélations de type logarithmique entre le volume des éboulements en masse et leur extension conduit à retenir, pour la fonction $\Phi(V)$, une expression de la forme :

$$\Phi(V) = 1 - \exp(-aX^c)$$

où $X = \log(V/V_0)$

a, c et V_0 sont des constantes

Le calcul est conduit de manière itérative par incréments de volume successifs. Le modèle calcule, pour chaque incrément, un état transitoire fictif de la morphologie du versant déterminant les conditions initiales du calcul de l'incrément suivant.

Les trois volets de la démarche présentée ci-dessus sont intégrés dans un modèle global permettant de traiter de manière homogène et continue les différents modes de propagation en fonction du volume de l'éboulement mis en jeu.

4. Calage du modèle

Le calage du modèle a été effectué d'une part dans le domaine des éboulements en masse, en l'appliquant à l'analyse de l'écroulement du Mont Granier (500 hm^3 , Savoie) pour les volumes supérieurs à 100 hm^3 , et d'autre part par continuité avec le domaine des éboulements classiques (volumes inférieurs à 10^5 m^3) pour lesquels on dispose de nombreuses validations.

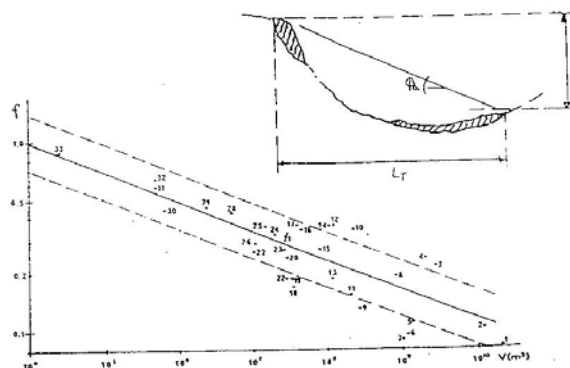


Fig.1 Corrélation entre le logarithme du volume (m^3) et le logarithme du coefficient de frottement.
 (d'après Scheidegger A.E.)

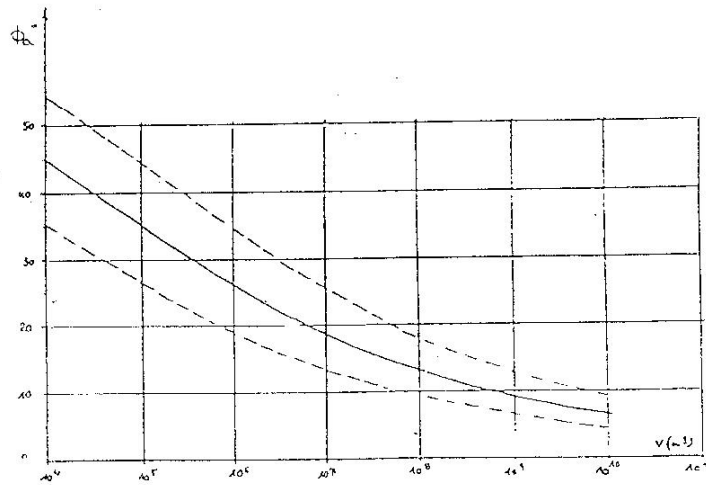


Fig. 2 Corrélation entre le volume V et l'angle de frottement apparent ϕ_0

2.1.1.7 Calage des paramètres et validations effectuées

Le logiciel EBMAS fonctionne en pseudo3D. L'utilisateur doit commencer par tracer les lignes "d'écoulement" de l'éboulis. Le tracé des lignes d'écoulement doit tenir compte de la morphologie générale du versant sur lequel se propage l'éboulement. Il est peu influencé par les détails morphologiques qui intéressent essentiellement les blocs isolés. Le maillage doit couvrir la totalité de la zone concernée par l'éboulement, à savoir : la zone instable et la zone d'étalement (versant aval, fond de vallée et éventuellement une partie du versant opposé). Le réseau d'écoulement (maillage) doit être continu et progressif. Les profils ne doivent en aucun cas se croiser. La largeur des canaux d'écoulement doit varier de manière continue. La morphologie de l'éboulis produit doit respecter, sauf localement, certains critères d'obliquité et de pente transversale :

- l'obliquité moyenne ne doit pas excéder environ 30° ;
- les pentes transversales de l'éboulis ne doivent pas être supérieures à la pente limite

Le cas échéant, des ajustements du tracé des canaux sont effectués en jouant sur la divergence des canaux dans les zones de non respect des critères, une nouvelle simulation est alors réalisée.

Le logiciel EBMAS suppose à priori que le phénomène étudié concerne un matériau granulaire sec, auquel cas le paramétrage est relativement simple. Ceci ne permet pas de prendre en compte l'influence éventuelle d'eau dans l'éboulement. Dans le cas de Val Pola, la simulation EBMAS ne permettait pas de rendre compte correctement de l'extension des éboulis. Ceci a conduit à introduire une majoration de 25 % de l'effet de masse pour tenir compte des quelques % d'eau effectivement présents dans la roche au moment de l'écroulement.

Ce type de paramétrage ne peut toutefois s'appliquer aux cas où le matériau se charge de grandes quantités d'eau au cours de sa translation (cf. cas du Six des Eaux froides). Pour cet exemple la présence vraisemblable de neige à l'interface masse en transit/terrain naturel n'a pu être prise en compte, cette spécificité n'étant pas disponible sur EBMAS (en cours de développement).

Pour les petits volumes, il a été nécessaire de forcer vers le bas les valeurs admises par le logiciel pour avoir une simulation conforme à la réalité (cf. cas de Charmonetier).

2.1.1.8 Philosophie d'utilisation

La modélisation donne la forme du dépôt consécutif à un éboulement déterminé. Pour la modélisation d'un éboulement secondaire, il est nécessaire au préalable de reconfigurer manuellement la nouvelle topographie consécutive au premier éboulement.

L'utilisateur doit avoir une bonne connaissance des phénomènes d'éboulements rocheux. Le premier stade du travail de simulation consiste en une analyse critique des documents disponibles, historique du site, photos, qualité, échelle des plans fournis ou à établir.

L'examen attentif des plans, MNT indispensable à l'établissement de lignes d'écoulement pertinentes doit être complété par des reconnaissances sur le terrain pour compléter l'identification et la prise en compte des particularités morphologiques.

Le paramétrage proprement dit fera appel à l'expérience de l'utilisateur en référence à d'autres sites connus.

Plusieurs scénarii de géométrie de la zone de départ doivent être envisagés, ceci nécessitant pour chaque configuration l'établissement d'un maillage spécifique.

Le domaine d'utilisation de l'outil est en configuration normale le matériau rocheux sec.

L'exemple de Val Pola a montré que la prise en compte de l'humidité dans la masse initiale devra être prévue dans les développements ultérieurs d'EBMAS.

L'outil ne fonctionne bien que dans les cas d'éboulements unilobés au départ de l'arrachement.

Le cas de Charmonetier a été résolu en ne prenant en compte qu'une partie de la zone de départ.

EBMAS, en cours de développement, est appelé à voir ses fonctionnalités et son ergonomie évoluer.

Chapitre 4 : Modélisation numérique de trois éboulements documentés

4.1 Six des Eaux Froides

➤ Conditionnement des données de départ

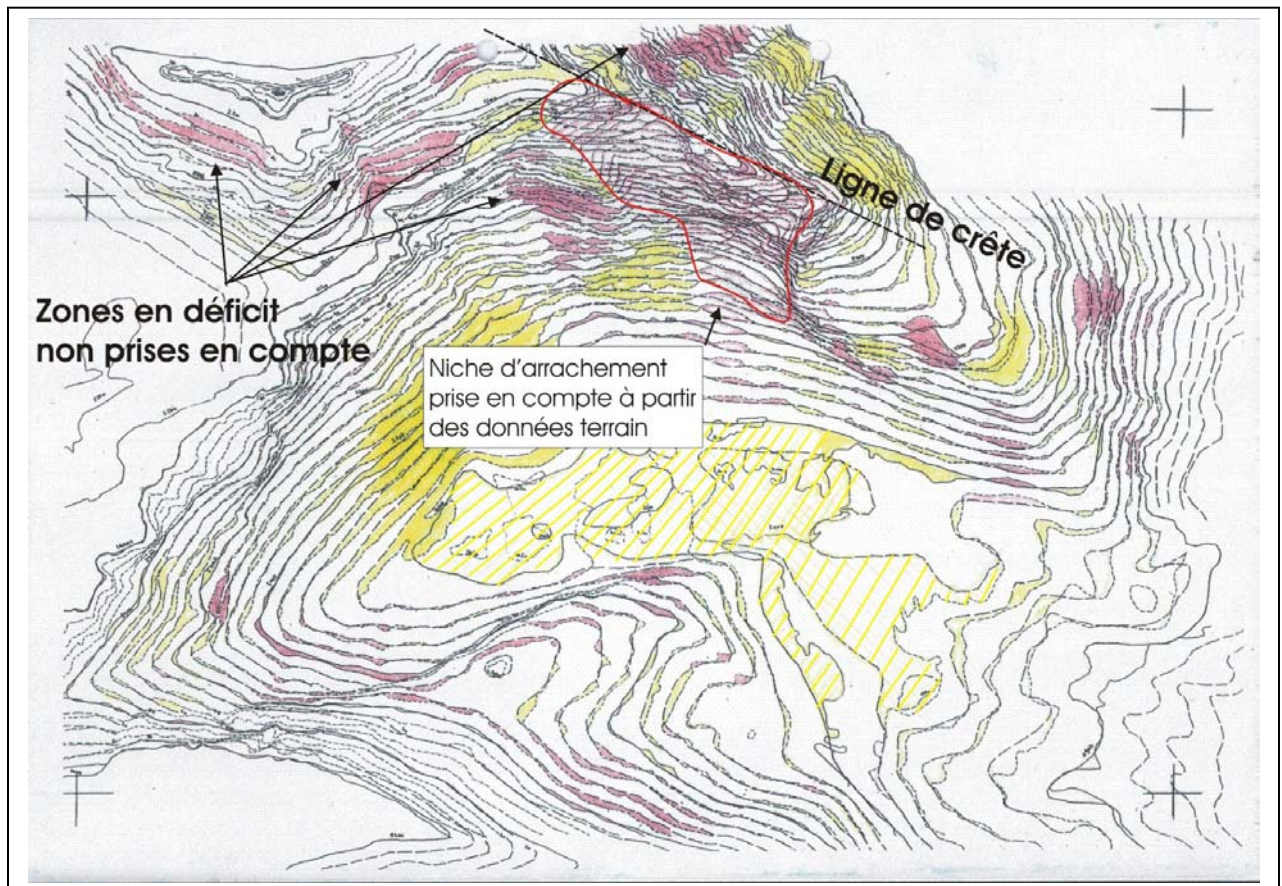


Fig.3 Comparaison des MNT 1946 et 1996 avant et après éboulement.
courbes de niveau trait plein MNT 46 courbes de niveau trait pointillé MNT 96
en rouge : départs théoriques en jaune plein : dépôts théoriques
en jaune hachuré : zone de dépôt cohérente avec les observations de terrain

La superposition des deux plans devrait à priori permettre de voir les secteurs ayant évolué entre les prises de vues de référence :

- secteur à priori concerné par l'éboulement
 - départ
 - transit
 - épandage
- secteurs non concernés par l'éboulement

On dispose en outre d'une photographie aérienne du site après l'éboulement, ce qui nous a permis de valider la localisation et l'extension de la niche d'arrachement.

Compte tenu des imprécisions détectées sur le MNT, la stratégie suivante a été suivie pour effectuer la simulation :

- abandon de la zone située derrière la crête et de celles à gauche de la niche d'arrachement ; (en cohérence avec les éléments détectés à l'examen de la photo aérienne) ;
- tracé du contour de la zone de départ sur le plan topo (issu du MNT).

➤ *Espace des paramètres, analyse de sensibilité*

Tous les paramètres doivent être renseignés. Dans le cas présent, le paramètre neige à l'interface masse en transit/terrain naturel non encore disponible dans le programme n'a pas pu être activé.

MAILLAGE DU DOMAINE

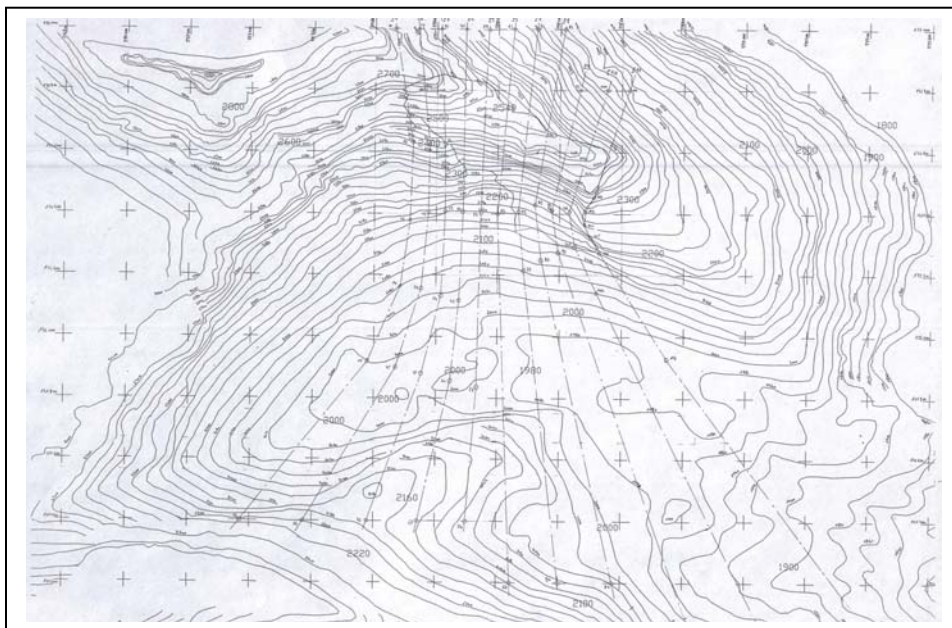


Fig. 4 définition du maillage = tracé des lignes d'écoulement.

Règles d'établissement des lignes d'écoulement :

- tracé peu influencé par les détails morphologiques qui intéressent essentiellement les blocs isolés
- couverture de la totalité de la zone concernée par l'éboulement à savoir : la zone instable, la zone d'étalement (versant aval, fond de vallée et éventuellement une partie du versant opposé)
- le réseau d'écoulement doit être continu et progressif, les profils ne peuvent se croiser
- les limites latérales du maillage (premier et dernier profil) doivent être constituées par des profils contenant les points d'extension extrêmes de la zone instable à gauche et à droite

Les profils précédemment définis sont numérisés.

Les points avant (en surface) et arrière (en profondeur) de l'aléa en place sont positionnés sur chaque profil de manière à formaliser la coupe de chaque profil où « tranche » ainsi définie^(*).

Le centre de masse de chaque tranche est déterminé.

Le logiciel calcule le volume en place par sommation des tranches (méthode d'approximation pyramidale) : 8,9 hm³.

(*) cette action constitue en fait le seul paramétrage actif, les autres actions ne constituant que des routines d'exécution du programme.

CALCUL DE L'ETALEMENT DES MATERIAUX

Entrée des paramètres

- o terrain : exemple sur le profil 4

Longueurs d'application de chaque catégorie de terrain en abscisses curvilignes à partir de la limite haute du profil

0 – 551 CAT.1 (rocher sain)
551 – 934 CAT.2 (éboulis compact)
934 – 1253 CAT.3 (éboulis meuble)
125 – 1279 CAT.2 (éboulis compact)
1279 – 1613 CAT.1 (rocher sain)

- o coefficient de foisonnement (par défaut valeur = 1,25)
- o volume de référence (volume qui va induire l'effet de masse)
- o pente limite de dépôt
- o longueur de référence (contrôle la courbure de la zone de dépôt, dépend du volume de référence)

vol. de réf. (m ³)	pente limite de dépôt (°)	volume de référence(m ³)	Lref (m)
1.10 ⁴	34	1.10 ⁴	14000
3.10 ⁵	33	3.10 ⁴	21000
1.10 ⁵	32	1.10 ⁵	31000
3.10 ⁵	30.7	3.10 ⁵	44000
1.10 ⁶	29.3	1.10 ⁶	66000
3.10 ⁶	27.8	3.10 ⁶	96000
1.10⁷	26.2	1.10⁷	143000
3.10 ⁷	24.6	3.10 ⁷	207000
1.10 ⁸	23	1.10 ⁸	309000

Réalisation de la simulation avec les résultats suivants :

- volume de l'arrachement : ici 8,9 hm³ en place ;
- profils donnant épaisseur et forme de l'éboulis, l'extension limite ;

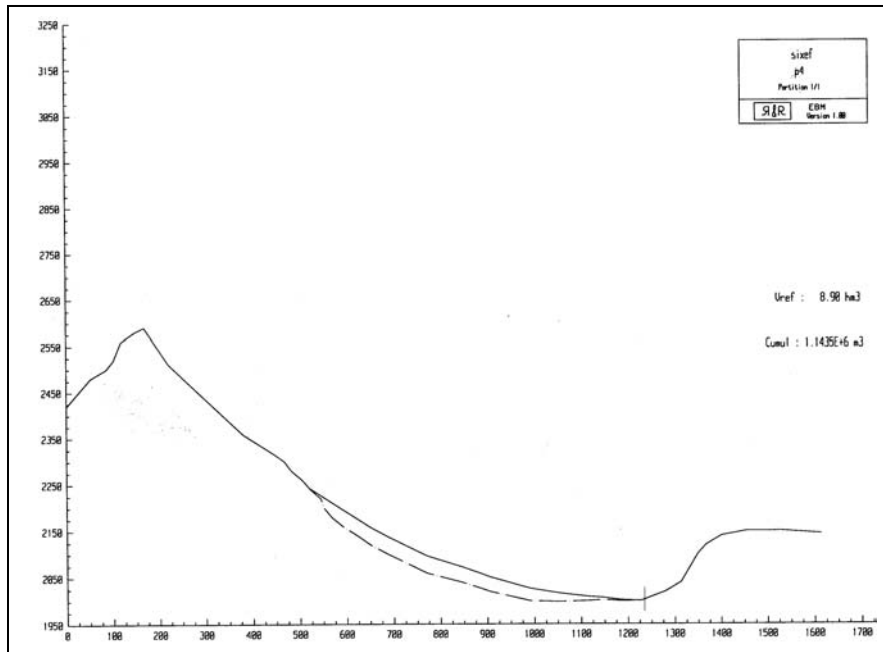


Fig.5
résultat par profil
d'écoulement

- fichiers renseignant sur les vitesses de propagation en fonction de l'abscisse curviligne sur chaque profil ;
- restitution de la morphologie résultante : plan en courbes de niveau du tas d'éboullis (insérable dans le plan AUTOCAD d'origine).

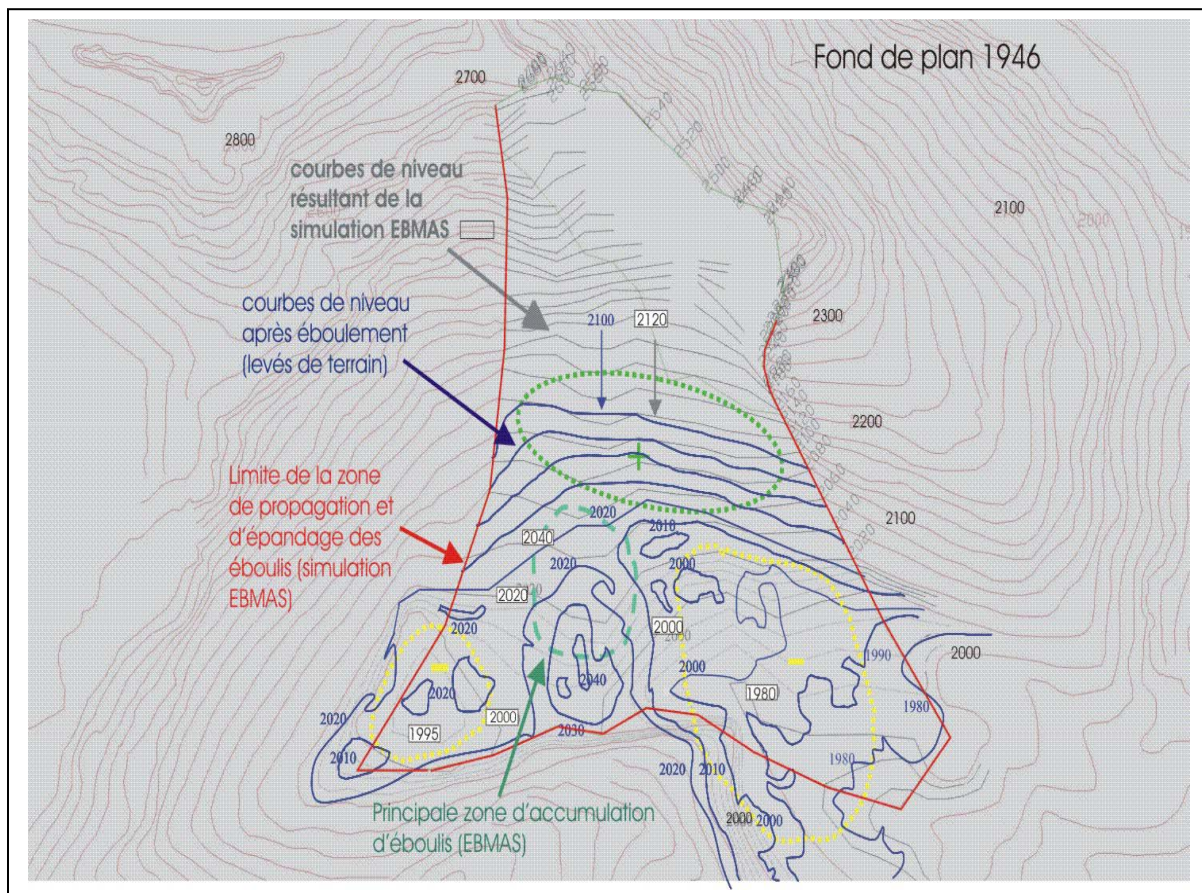


Fig. 6 résultat sous forme d'un plan en courbes de niveau

➤ ***Problèmes rencontrés, commentaire sur les résultats de la simulation***

Deux aspects sont examinés : limite d'atteinte et épaisseur des éboulis

La simulation donne une limite d'atteinte des éboulis pratiquement conforme à la réalité pour le lobe gauche et la partie centrale. L'extension du lobe droit est largement minimisée.

La simulation donne une épaisseur d'éboulis plus importante que dans la réalité dans la zone de transit de l'éboulement (+ sur la fig.6) et minimise largement l'épaisseur de l'éboulis dans les deux lobes latéraux (- sur la fig.6)

Par ailleurs, la simulation ne rend pas compte de l'amas pseudo circulaire (cote 2030/2040) bloqué contre la falaise qui fait face à l'éboulement. A ce niveau L'accumulation correspondant à la simulation s'est arrêtée d'elle même environ 100m avant d'atteindre la falaise.

Dans la réalité, la masse en mouvement a conservé son énergie plus longtemps que dans la simulation et a quasiment rebondi sur la falaise en vis à vis, ce qui se traduit par de petites excroissances en retour de chaque côté du tas d'éboulis principal. Dans sa configuration actuelle EBMAS aurait du rendre compte de cette configuration. La non prise en compte du manteau neigeux à l'interface terrain/éboulement peut expliquer cette anomalie.

Un module spécifique à ce cas de figure qui n'est pas rare en montagne au printemps est en cours de développement.

L'autre aspect du phénomène étudié concerne la présence d'un lac à la base du versant au moment de l'écoulement, la liquéfaction partielle de l'éboulis à son arrivée dans le lac explique par ailleurs que le lobe droit se soit propagé beaucoup plus loin en réalité que dans la simulation. On peut parler d'un phénomène biphasé séquentiel.

EBMAS n'est pas construit pour prendre en compte la simulation de propagation de ce type de milieu plus proche d'une lave torrentielle que d'un écoulement granulaire sec, pas plus d'ailleurs que la simulation de phénomènes biphasés.

4.2 Charmonetier

➤ Conditionnement des données de départ

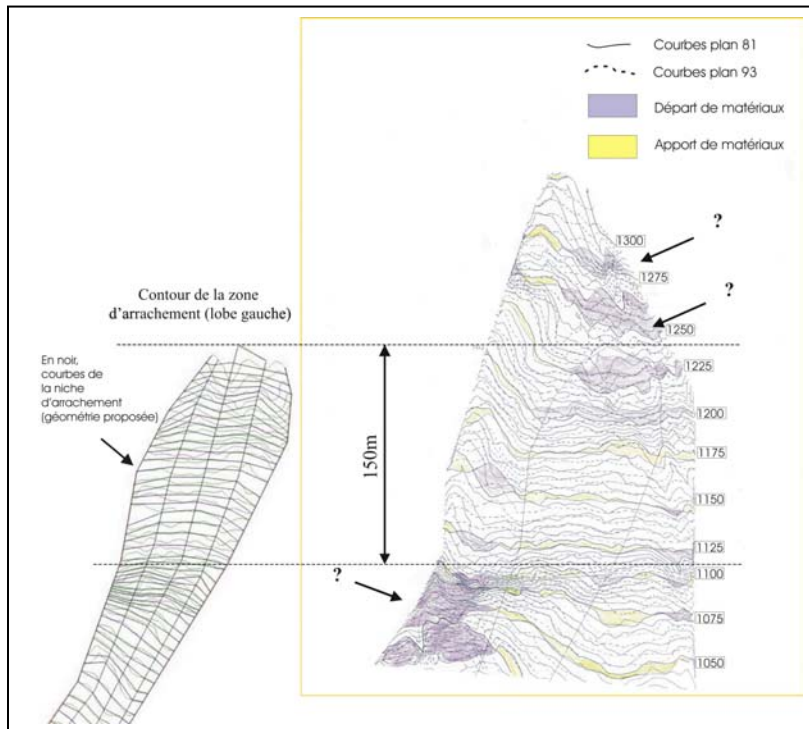


Fig.7 Zone d'arrachement, comparaison des MNT 1981 et 1993

Selon la comparaison des MNT, la zone concernée par l'arrachement n'indique qu'un léger départ de matériaux dans sa partie supérieure, ceci est en contradiction avec les reports effectués sur plan par les géologues après l'éboulement.

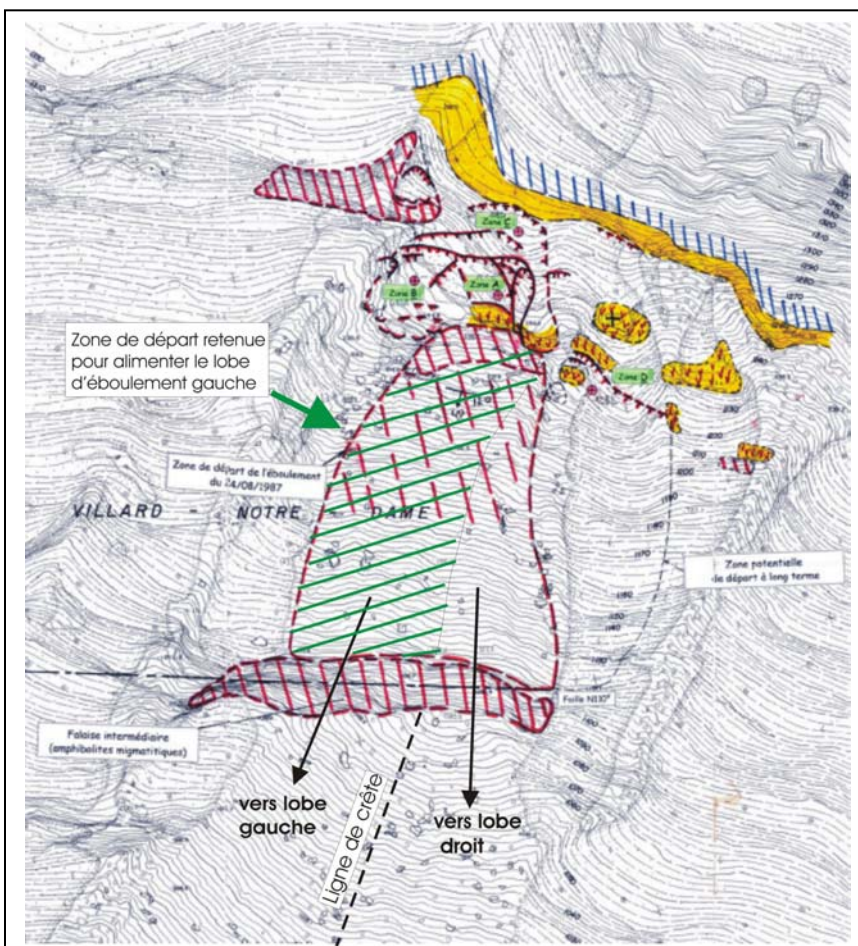


Fig.8 Zone d'arrachement prise en compte.

Le volume global concerné est faible, de l'ordre de 100000m³. L'éboulement présente la particularité de s'être scindé en deux lobes indépendants à partir de la zone de départ. Pour à priori ne pas trop s'écarter du thème "grande masse", nous n'avons étudié que la partie gauche, la plus importante de l'éboulement, la partie droite ne présentant qu'un volume d'environ 30000m³.

Le MNT n'étant pas pertinent quand à la matérialisation de la forme de la niche d'arrachement, nous avons considéré sur la base des données d'observation que l'épaisseur de la zone source était de 10m.

➤ *Espace des paramètres, analyse de sensibilité*

MAILLAGE DU DOMAINE

Les couloirs de propagation ont été définis à partir de la zone de départ, la légère concavité de la surface topographique sur la partie haut du tracé implique une certaine convergence des tracés jusqu'au passage en canyon de la barre rocheuse inférieure. Ensuite, pour la partie basse, les canaux divergent largement en se calquant sur la forme du cône d'éboulis.

Le logiciel calcule le volume en place : 0,064 hm³.

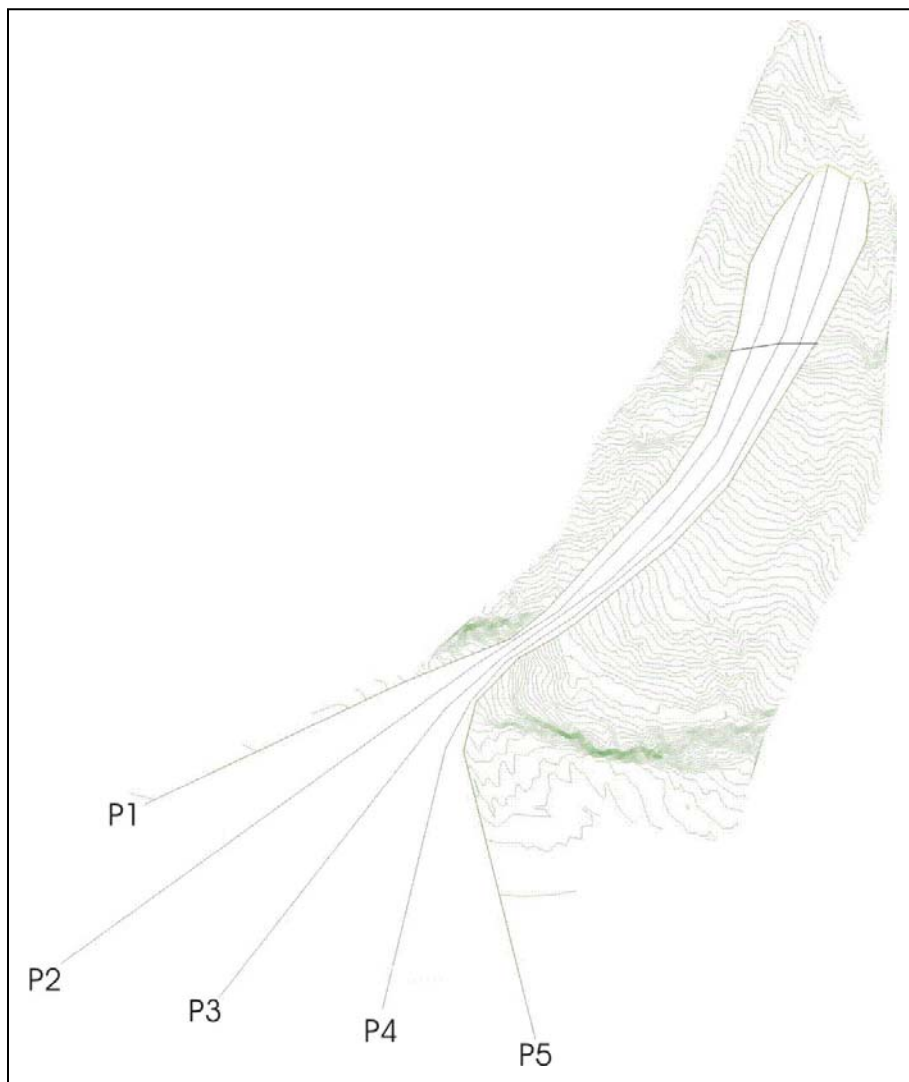


Fig. 9 Tracé des lignes d'écoulement.

CALCUL DE L'ETALEMENT DES MATERIAUX

Entrée des paramètres :

- | | | |
|---------------------------------|------------------------|---|
| - terrain (exemple du profil 2) | | - coefficient de foisonnement : 1.25 |
| 0 – 168 | CAT.5 (rocher altéré) | - volume de référence : 0,064 hm ³ |
| 168 – 551 | CAT.3 (éboulis meuble) | - pente limite de dépôt : 32,52° |
| 551 – 889 | CAT.4 (terrain meuble) | - longueur de référence : 24700 |

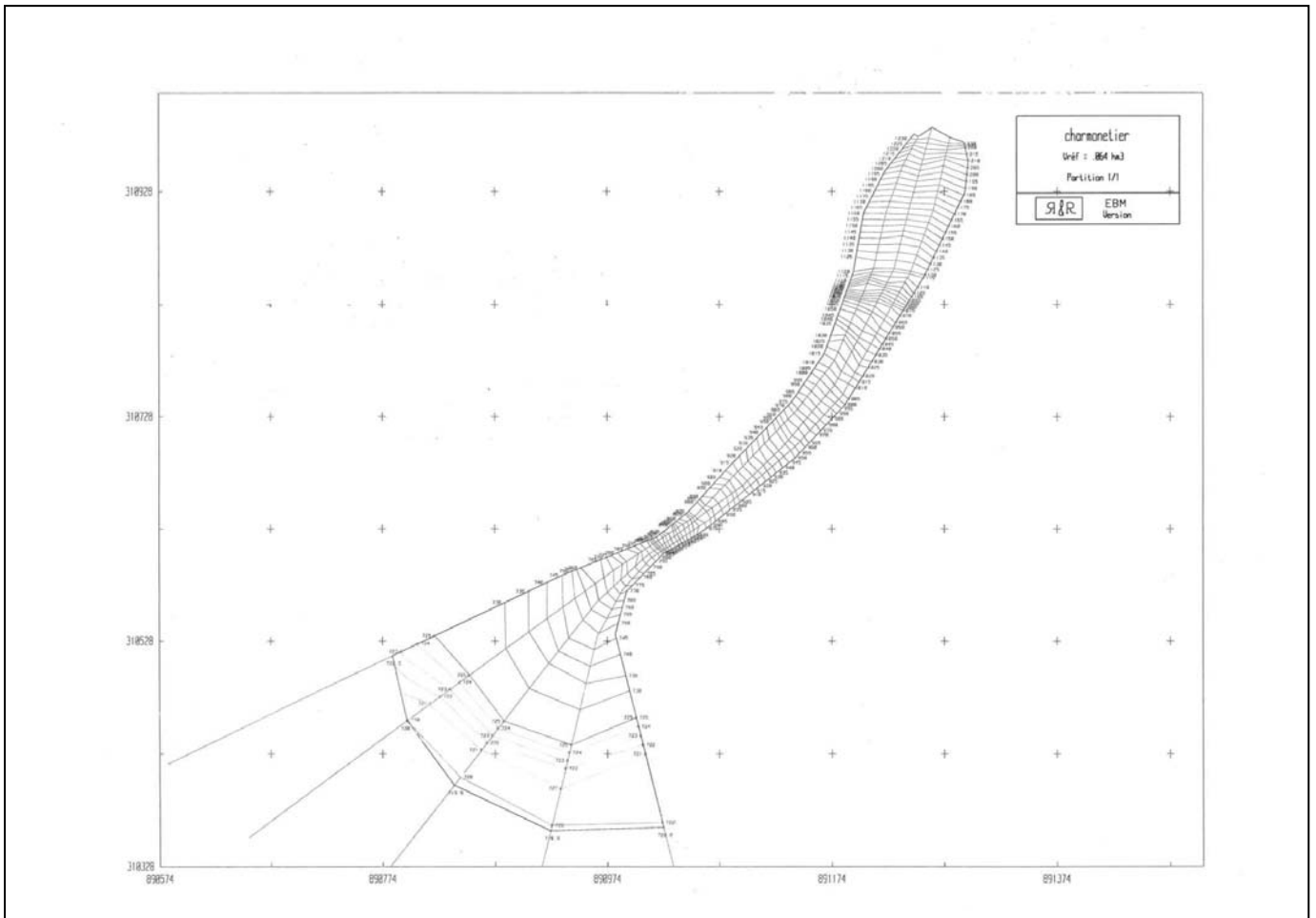


Fig. 10 Résultat de la simulation

La comparaison de la topographie issue de la simulation avec la topographie originelle indique une absence de dépôts à l'amont de la cote 775. Seule la partie du versant située à l'aval de cette cote, a été représentée sur la figure suivante.

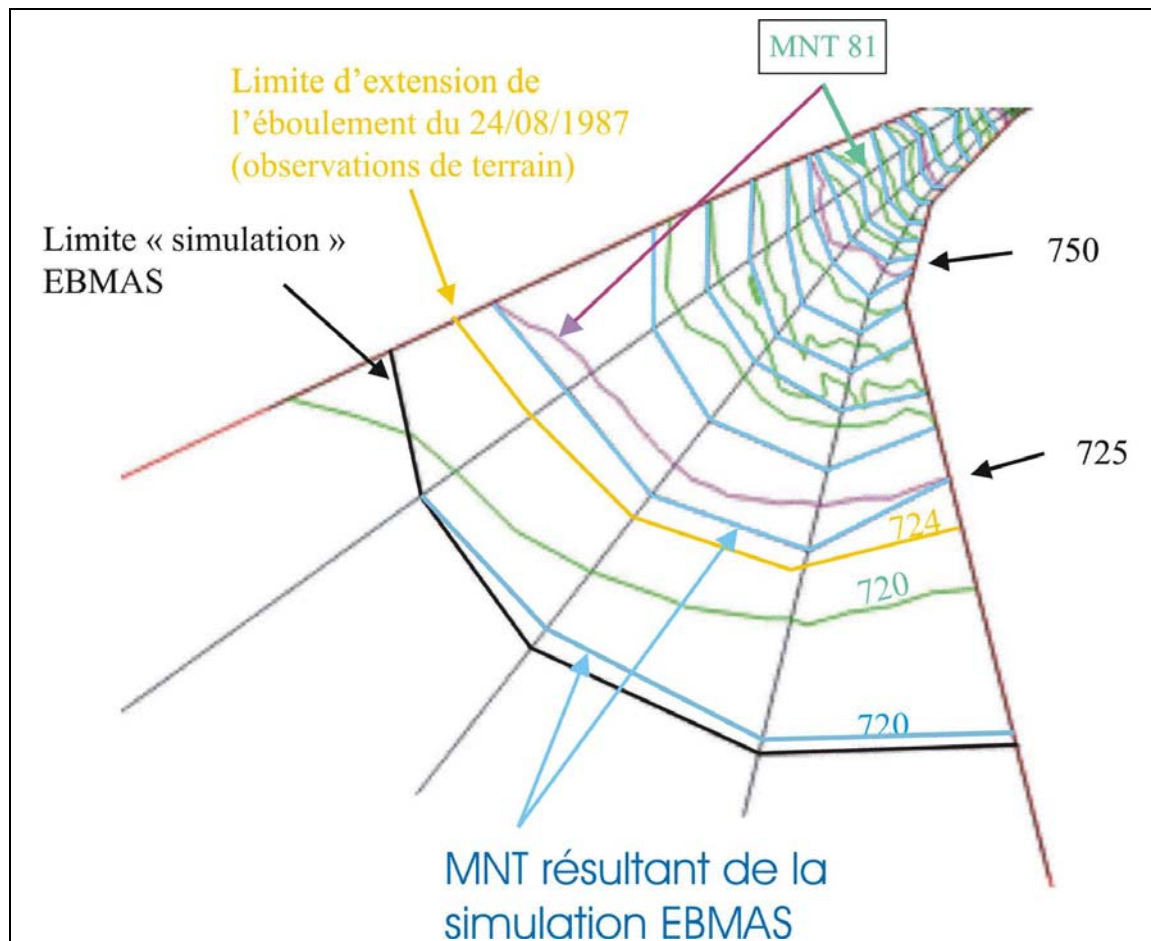


Fig.11 Plan des éboulis - superposition de la topographie résultant de l'éboulement avec le MNT de 1981 (avant éboulement).

EBMAS indique une longueur de propagation d'environ 10% supérieure à la réalité. Dans le cas présent, la différence est importante, elle concerne une zone d'habitations.

Compte tenu du faible volume en jeu, il est vraisemblable de considérer qu'il n'y a plus du tout d'effet de masse dans la propagation des éboulis.

Pour valider cette hypothèse une simulation contradictoire a été effectuée avec le logiciel PROPAG CETE (blocs isolés, petits volumes) en retenant les mêmes catégories de terrain. Les départs de blocs ont été positionnés au sommet de la niche d'arrachement pour connaître la limite d'atteinte extrême de blocs isolés

Le résultat (cf. fig.12) coïncide parfaitement avec la réalité en utilisant un paramètre d'élancement faible : 1,2 (d'après le repérage des blocs éboulés sur les photos disponibles).

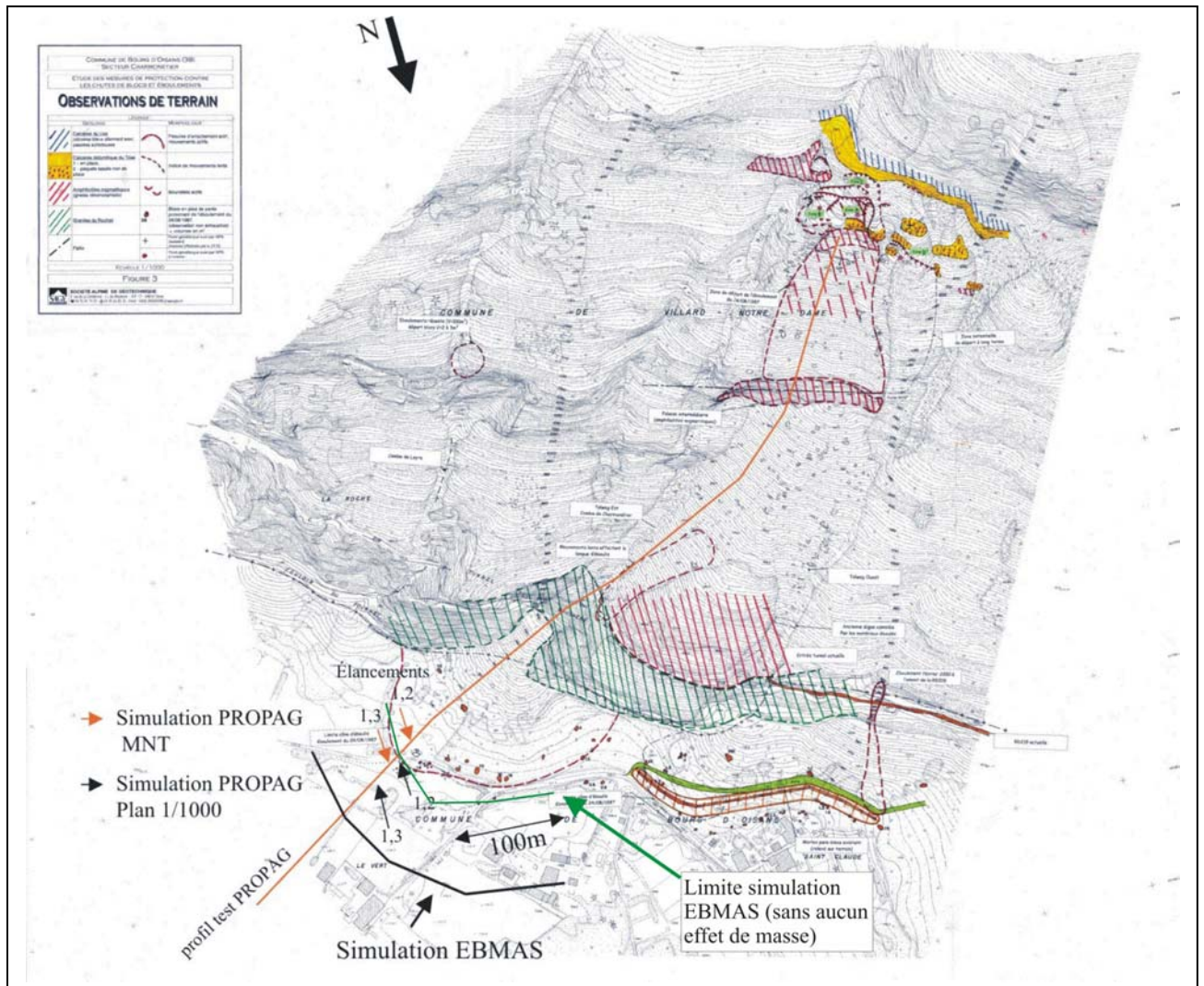


Fig.12 résultat des différentes simulations EBMAS et PROPAG

Une autre simulation EBMAS a été réalisée en calant les paramètres au minimum pour ne pas prendre en compte l'effet de masse :

pente limite de dépôt : 34°
longueur de référence : 14000

Ce paramétrage ne change pas significativement le résultat.

R&R a introduit pour ce type d'éboulement, où l'effet de masse ne joue pratiquement pas, un facteur d'amortissement K_{rede} réglable agissant sur l'élanement E ($0,85 \leq K_{rede} \leq 1$). La valeur de référence est réglée à $K_{rede} = 1$. Il est possible de la forcer exceptionnellement pour certains cas particuliers.

Le paramétrage Krede = 0,85 nous a permis d'obtenir un contour du tas d'éboulis très proche de la réalité.

➤ *Problèmes rencontrés, commentaire sur les résultats de la simulation*

Le faible volume de matériaux en jeu situe cette simulation à la marge inférieure des possibilités de l'outil avec un effet de masse nul dans le mécanisme de propagation. Même calé au minimum, le paramétrage n'a pas permis d'obtenir un résultat conforme à la réalité.

Un paramètre d'amortissement en relation avec l'élancement résiduel des blocs a été introduit et a permis de reproduire fidèlement l'extension du tas d'éboulis.

4.3 Val Pola

➤ *Conditionnement des données de départ*

L'analyse a été effectuée en deux dimensions sur le seul profil initialement proposé (dans l'axe de l'éboulement). La simulation en 3D n'a pas été possible avec la version actuelle du modèle EBMAS, la prise en compte des effets rebonds sur le versant opposé n'étant pas finalisée et opérationnelle.

➤ *Espace des paramètres, analyse de sensibilité*

La simulation a été réalisée avec une version modifiée du logiciel EBMAS permettant une analyse en deux dimensions.

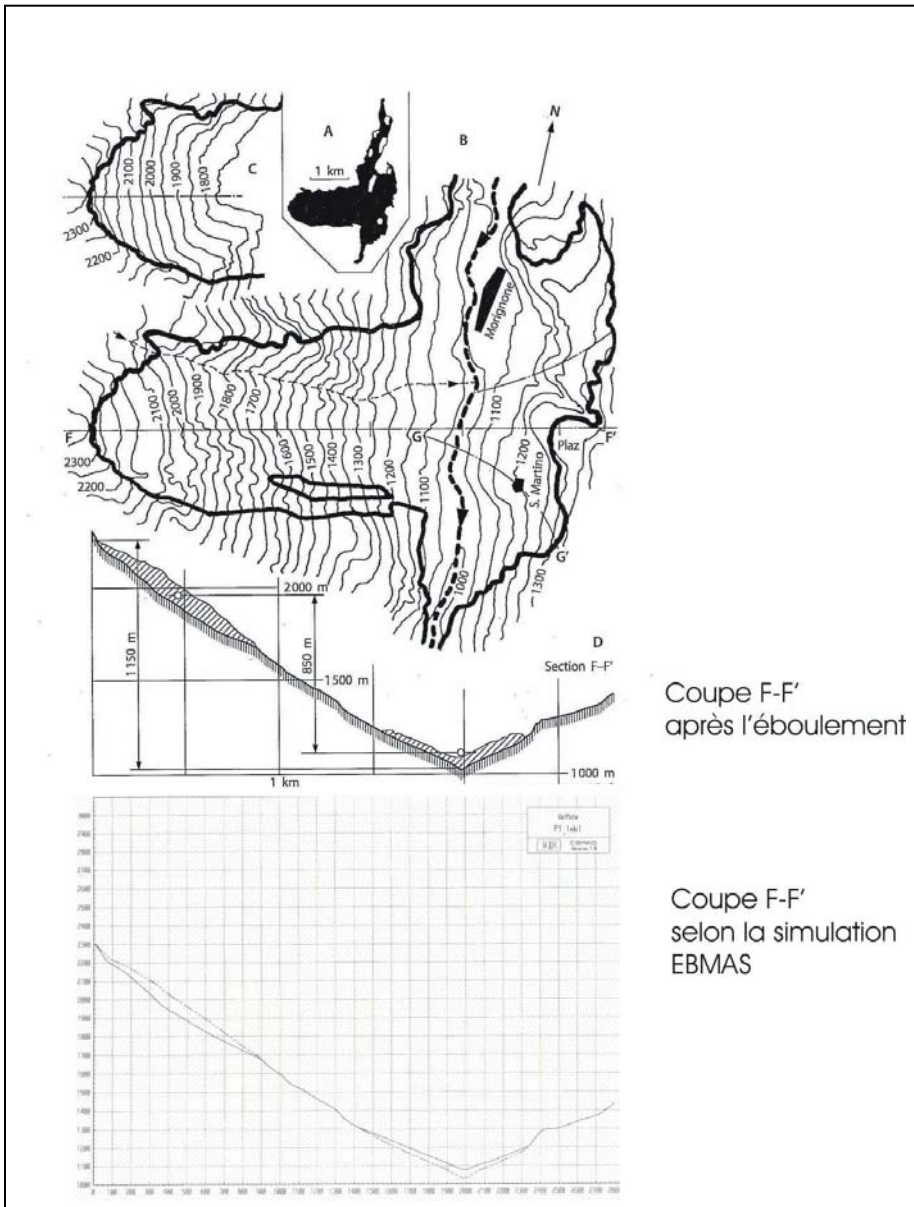
Les calculs ont porté sur un profil isolé et non sur un réseau d'écoulement ;

Ceci a nécessité la prise en compte de la divergence de l'écoulement en conditions 3D réelles (par tendance à l'étalement latéral du tas d'éboulis) par l'application d'un coefficient de transposition $\lambda_{2D} = 0,53$ déterminé à partir des données bibliographiques du site (cf. Abele).

Par ailleurs, un coefficient majorateur a été introduit dans la fonction prenant en compte l'effet de masse pour tenir compte de la présence d'une certaine quantité d'eau dans le matériau (à l'échelle de la porosité de fissure du massif) du fait des conditions hydrométéorologiques au moment de l'éboulement.

Une majoration de 25% de l'effet de masse a été introduite dans le logiciel pour prendre en compte les quelques % d'eau présents dans le terrain au moment du déclenchement de l'éboulement.

Cette eau s'est vraisemblablement vaporisée au cours de l'éboulement créant ainsi une pression interne réduisant la dissipation d'énergie par rapport à un matériau sec.



- volume de référence
(volume qui va induire
l'effet de masse) : 40
hm³

- volume de la partition
correspondant à la
"tranche" de 1m utilisée
pour les calculs : 24037
m³

- coefficient de
foisonnement : 1,25

- coordonnées du centre
de masse : 404 ; 1992,5

- pente limite de dépôt :
23°

- longueur de référence:
342997m (grandeur qui
caractérise la courbure
d'étalement des débris).

Coupe F-F'
après l'éboulement

Coupe F-F'
selon la simulation
EBMAS

Fig.13 comparaison des profils réels et simulés.

- Vitesse de propagation :

La vitesse moyenne globale déterminée sur l'ensemble de l'éboulement est de 60,5 m/s (de l'ordre de 220 km/h). Elle correspond à un temps de parcours global (dans la zone centrale de l'éboulement suivant le profil P1) de 32,2 secondes, ce qui est en bon accord avec les données bibliographiques qui font état d'une durée de l'ordre d'une trentaine de secondes.

La vitesse maximum atteinte en bas du versant est d'environ 90 m/s (320 km/h).

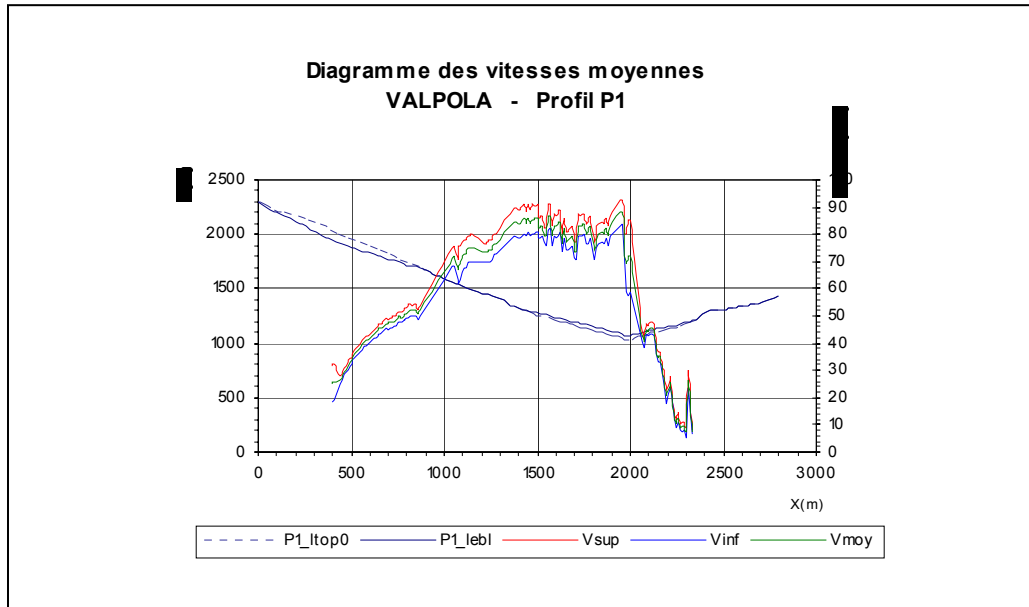


Fig.14 Vitesses de propagation.

➤ ***Problèmes rencontrés, commentaire sur les résultats de la simulation (2D)***

Les limites du tas d'éboulis sont conformes aux données d'observation.
Les volumes sont moindres au départ, mais ceci correspond aux données transmises pour l'étude, il en résulte logiquement un plus faible volume étalé.
Il existe un bourrelet frontal sur la coupe issue de la bibliographie, bourrelet que l'on ne retrouve pas avec la simulation. Ceci mériterait d'être vérifié par des observations de terrain.