



EL DESENCADENAMIENTO DE ALUDES DE PLACA: UNA COMBINACIÓN DE 4 MECANISMOS

¿Cómo puede ser que el paso de un esquiador sobre una zona ya esquiada algunos instantes antes, y que parecía estable, pueda poner en marcha una avalancha en gran escala?

¿Por qué ciertas avalanchas son puestas en marcha por esquiadores desde un terreno llano?

¿Por qué ciertos desencadenamientos son provocados por espesores fuertes de nieve, y otros no?

¿Cómo puede ser que el solo peso de un esquiador pueda bastar con poner en marcha la salida de una masa de nieve más importante, que su propio peso?

En este artículo se presenta un nuevo visión a este problema, considerando que la acción del esquiador se limita a un efecto iniciador en la rotura de la capa frágil, que posteriormente puede propagarse espontáneamente bajo el solo efecto del peso de la nieve.

Estas explicaciones están en consonancia con lo que podemos observar en el mismo lugar: nos permiten comprender por qué ciertas avalanchas se producen de un modo inesperado, pero también (es la mayoría de los casos), por qué no se producen cuando se dan las condiciones necesarias para el desencadenamiento de las avalanchas.

El artículo presente, tiene como objetivo exponer estos principios fundamentales de este enfoque.

ALGUNOS CONCEPTOS BÁSICOS

Podemos distinguir dos tipos de avalanchas: las avalanchas espontáneas por un lado, y artificiales o accidentales por el otro. Nos interesaremos aquí sólo por las segundas, las que tienen están formadas sobre la base de una placa apoyada sobre una capa frágil.

Es la cohesión de la capa frágil la que retiene la placa en la pendiente (resistiendo así a la fuerza motriz debida al peso de la placa) y la cohesión de la placa misma la que impide romperse (no es el caso del agua, que sin cohesión, fluye inmediatamente en la pendiente).





La sobrecarga de un esquiador (80 kg) es extremadamente débil en comparación del peso de la nieve implicada en el proceso de desencadenamiento (varios millares de toneladas). Si la desestabilización se produce, no puede ser debida a esta débil sobrecarga, sino más bien a la disminución de la cohesión de la capa frágil en el momento del paso del esquiador. El efecto de esta perturbación local acumulada a lo largo del recorrido del esquiador puede tener consecuencias a gran escala. Es lo que vamos a ver detalladamente ahora.

El sistema puede ser esquematizado por la figura 1.

La placa es representada por una serie de elementos unidos por muelles, que pueden alargarse o comprimirse con arreglo a los esfuerzos a los cuales están sometidos, o romperse si esfuerzos exceden un valor umbral. De modo similar, la placa esta unida a la nieve más antigua por una capa frágil, representada por una especie de castillo de naipes que puede hundirse si el esfuerzo al cual está sometido es demasiado para éste. Consideramos que el castillo de naipes llega a retener la placa si no se rompe, y si se rompe ésta se desprende.

Las cuatro etapas que intervienen en la cronología del desencadenamiento, están basadas en las propiedades que acabamos de exponer y son detalladas a continuación.

UNA COMBINACION EN 4 ETAPAS

El mecanismo de desencadenamiento se pone en ejecución con las cuatro etapas siguientes:

1. Hundimiento local del castillo de naipes que provoca un principio de rotura de la capa frágil.
2. Extensión de esta rotura en la capa frágil.
3. Inicio de la grieta somital en la placa.
4. Extensión de la grieta somital, que conduce al desencadenamiento (figura 2).

Estas etapas, todas necesarias, actúan por este orden, lo que significa que si por una razón cualquiera uno de ellas no se produce, la avalancha no se pone en marcha. Estas cuatro etapas ahora son analizadas detalladamente.



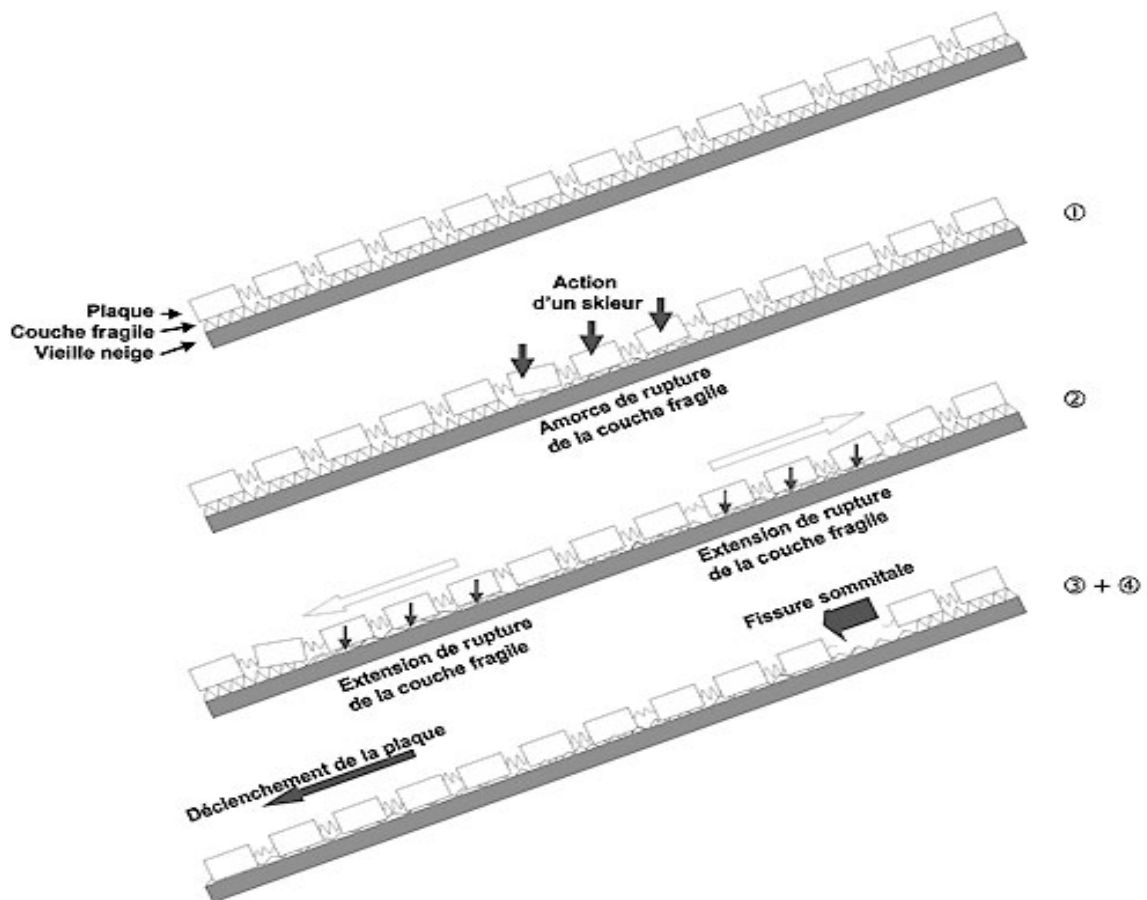


Figura 1: Una placa sobre una capa frágil puede ser descrita como una serie de elementos unidos entre ellos y que reposan sobre un castillo de naipes; (1) la acción del esquiador puede hundir localmente el castillo de naipes; (2) el hundimiento puede propagarse bajo el efecto del peso de la nieve; (3 y 4) cuando la extensión del daño la capa frágil es bastante grande, el peso de la parte hundida de la placa puede provocar el principio y posterior propagación de la grieta somital, seguidas generalmente por la ruptura de la placa.



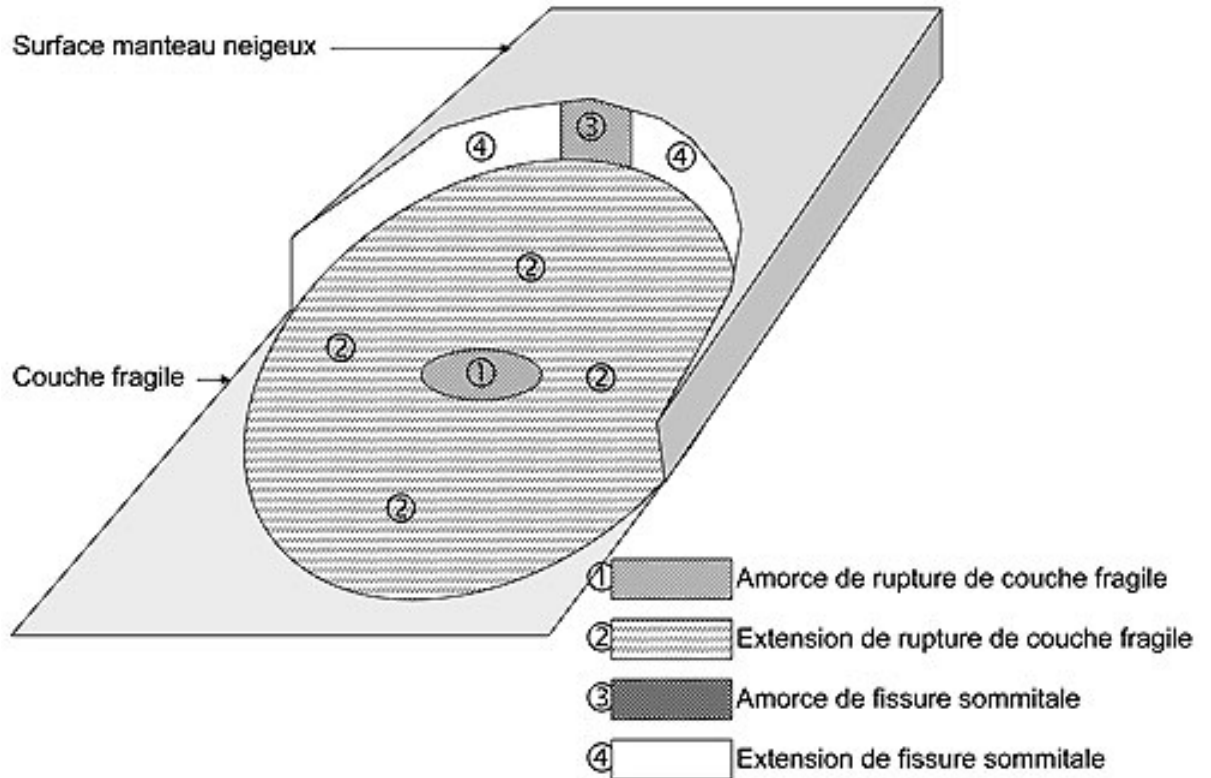


Figura 2: Las cuatro etapas necesarias para la ruptura de una placa

1. Hundimiento local del castillo de naipes que provoca un principio de rotura de la capa frágil.

En una pendiente, la capa frágil está sujeta a la vez al factor de Cizallamiento (paralelo a la pendiente) y de compresión (perpendicular a la pendiente) del peso de la nieve que soporta. Estos dos componentes aumentan conforme al espesor y densidad de la nieve. El Cizallamiento aumenta en detrimento de la compresión, a medida que la pendiente se acentúa. La capa frágil está dañada cuando la carga local que soporta (combinando Cizallamiento y compresión) excede de su resistencia mecánica.

El peso de un Esquiador o de una moto de nieve no aumenta significativamente la carga total ejercida sobre la capa nieve, pero esta carga adicional está distribuida en una superficie muy pequeña (por ejemplo las suelas de los esquís), que se traduce en una gran presión que puede dañar localmente la capa frágil. Este efecto local del Esquiador se ve agravado en condiciones dinámicas (sobre presión en un viraje cerrado, o recepción después de un salto, efecto similar al obtenido con una explosión.





El efecto resultante reduce la resistencia que la capa frágil opone al desplazamiento de la placa. El desplazamiento del Esquiador aumenta gradualmente esta zona de ruptura. El Castillo de NAIPES también puede derrumbarse localmente sobre un terreno llano con el paso del Esquiador, lo que conduce también a la iniciación de la ruptura de la capa frágil.

2. Extensión de esta rotura en la capa frágil.

El mecanismo de ampliación de esta ruptura puede ser de dos tipos diferentes:

- **modo A:** a causa de la acción local del Esquiador, se extiende al FRU y a medida que este último progresa (figuras 3a e)
- **modo B:** la rotura iniciada por el Esquiador se extiende espontáneamente, bajo la acción del único Peso de la nieve y mucho de la zona recorrida por este último (figura 3C). En este caso en efecto, la ampliación de la ruptura proviene de la energía recuperada del colapso.

El peso del Esquiador no tiene ningún efecto en esta fase, la masa de nieve el origen de extensión son mucho más importante.

La condición de aparición del modo B (propagación espontánea) obedece a una ley de mecánica de la rotura, el criterio de Griffith (1920): para una carga determinado, la zona de ruptura se extiende espontáneamente de alta velocidad (varias decenas de m/s) si se excede de un tamaño crítico, que depende de la resistencia del medio. Cuanta mas carga, más es el tamaño crítico DIN

En un terreno llano, los argumentos anteriores son siempre válidos y la zona de ruptura puede propagarse si el peso de la nieve sea suficiente. Sin embargo, la zona de rotura no podrá desencadenar una Avalancha que si se extiende hasta pendiente similar de inclinación suficiente, y se desarrolla (Figura 5). Las características de la Avalancha desencadenada dependen estrechamente del modo de propagación de la zona de ruptura (A o B). Este tema tan importante se expondrá a continuación.





Extension de la rupture de la couche fragile

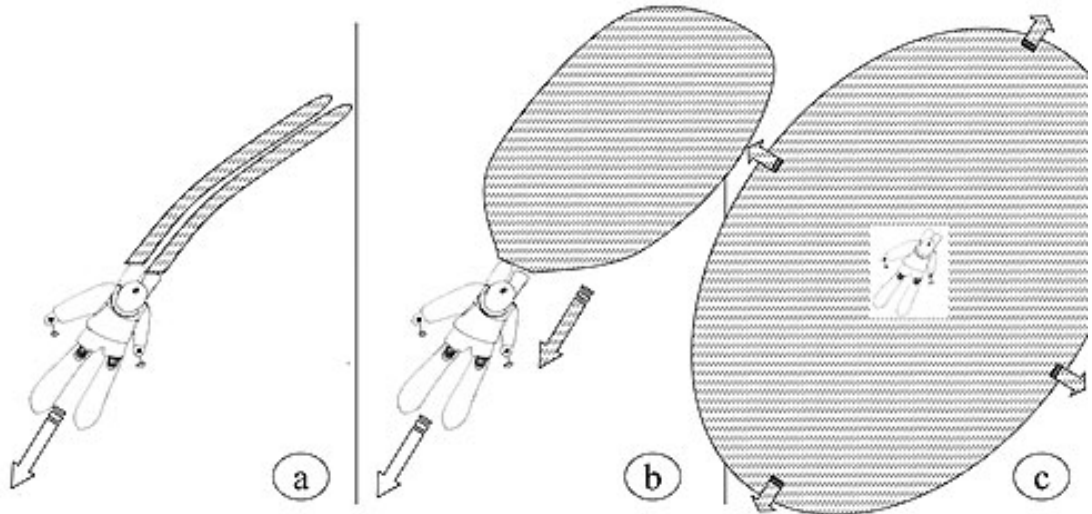


Figura 3: (A) la capa frágil poco cubierta de nieve no se desploma que en el paradero de esquís; (b) la rigidez de la placa, q hunde en las esquís, permite un colapso más amplia que la traza esquís; (c) a partir de un tamaño crítico, la ya de la capa frágil se propaga rápidamente bajo el único efecto del peso de la nieve.

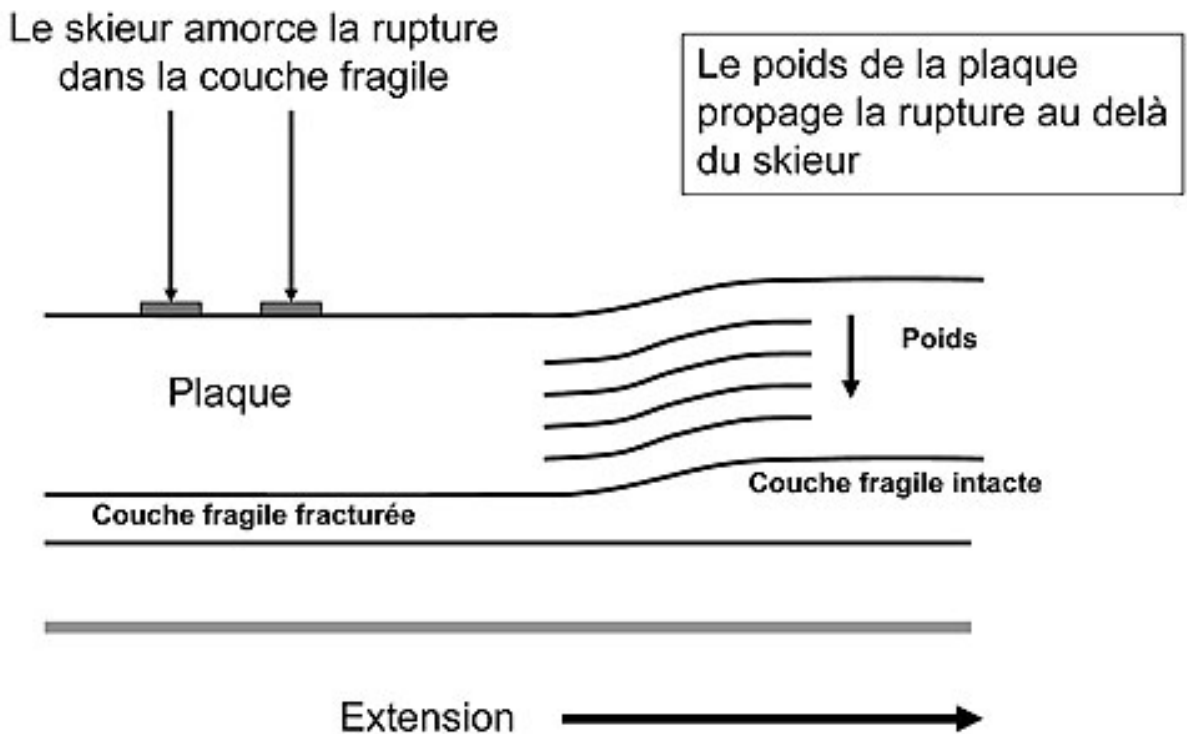


Figura 4: Esquema que muestre el colapso de la capa frágil y su propagación. El peso de la placa provoca la extensión progresiva de la ruptura de la capa frágil (según Johnson y otros, 2000).



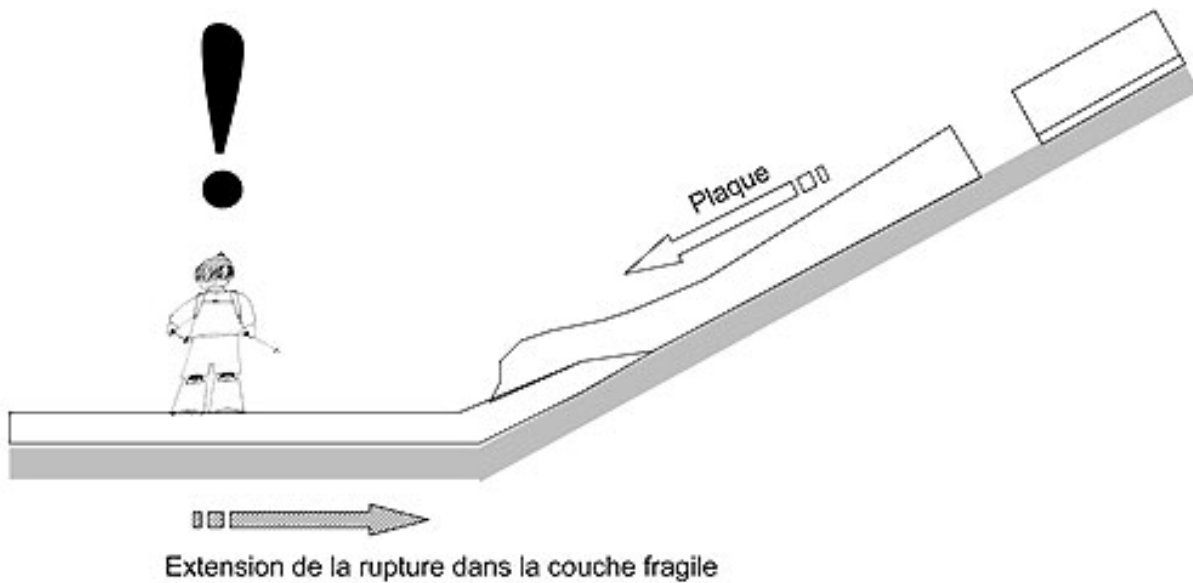


Figura 5: Una zona de ruptura sobre suelo plano puede desencadenar una Avalancha si se extiende hasta una pendiente similar y se propaga.

EL DESENCADENAMIENTO DE UN ALUD DE PLACA: PRINCIPIO Y FIN

3. Inicio de la grieta somital en la placa.

A medida que la ruptura de la capa frágil se extiende sobre la pendiente, el peso de la placa va aumentando y actuando sobre la cohesión de la capa frágil que las unía trasladando esta tensión al nivel de los bordes de la placa. Estos esfuerzos aumentan evidentemente con el peso de la parte « suspendida » de la placa, es decir con el tamaño de la zona de ruptura, hasta alcanzar el umbral de ruptura de la placa. Es el inicio de la fisura somital. El lugar y el momento de inicio la fisura somital dependen en gran medida del mecanismo de propagación de la ruptura de la capa frágil (ver figura 6).



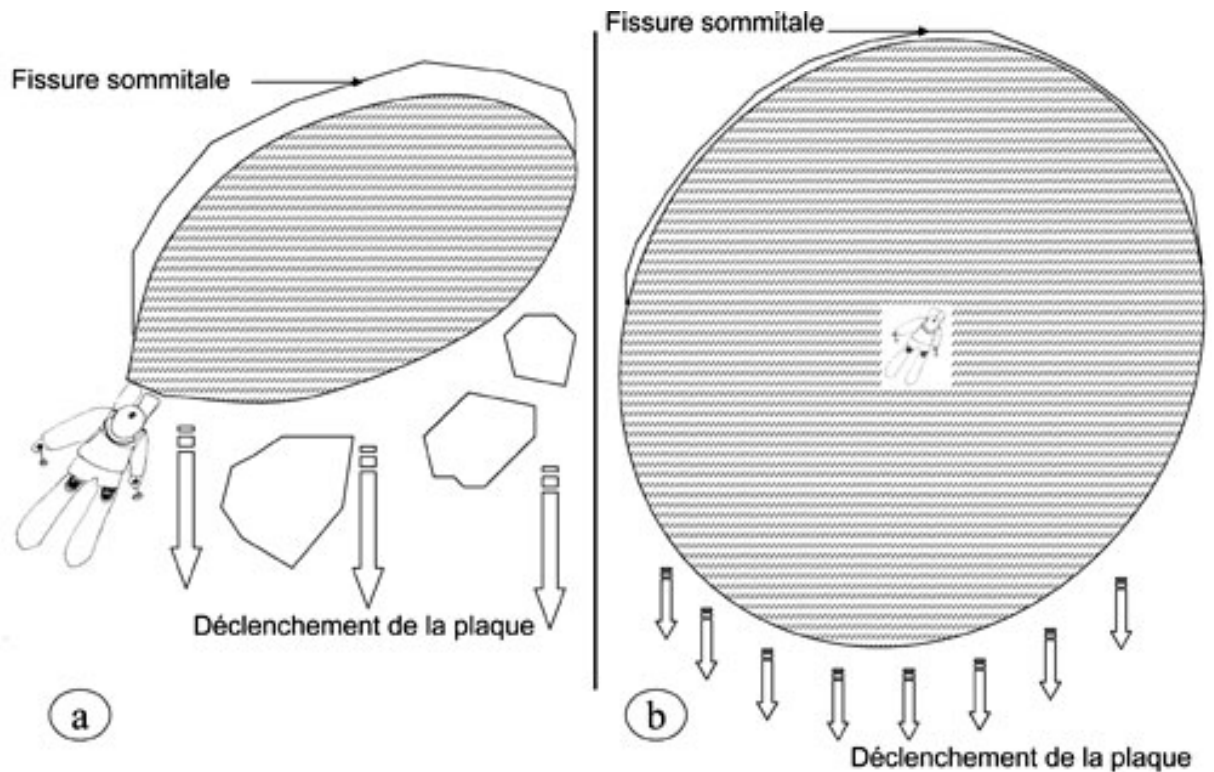


Figura 6:

A) activación en modo A: la zona de partida se limita aproximadamente a la zona dañada por el Esquiador

(b) activación en modo B: la zona de partida es amplio y la fisura somital no se abre muy lejos del Esquiador se encuentra atrapados en medio de la placa.

4. Extensión de la grieta somital, y desencadenamiento del alud

De conformidad con el criterio de Griffith, si el esfuerzo está en la parte superior de la parte libre de la placa éste, es suficiente para abrir una inicio de la fisura somital, aumentando su poder de propagación. La fisura somital aumenta muy rápidamente, liberando la placa y dando lugar a una Avalancha. En la mayoría de los casos por consiguiente, el inicio de la fisura somital es casi inmediatamente seguida del estallido. Sin embargo, como la capa frágil, el umbral de ruptura de la placa puede variar de un lugar a otro. Una fisura somital puede abrirse en un lugar favorable, para terminar de propagarse cuando encuentra zona más resistente. En este caso, la ruptura de la capa frágil no es más que el principio de la Avalancha, sigue su progresión en la placa, en particular hacia la parte superior (véase «2. Activación en modo B").





a. Desencadenamiento modo A

Se produce en la ampliación progresiva de la zona de ruptura debida a la acción del Esquiador. La zona de partida se limita a la zona dañada por el Esquiador, que se encontrará, probablemente en el borde de zona en el inicio. Este escenario es favorecido por una baja cohesión de la placa. La Entalladura hecha por los esquíes en una placa blanda puede también favorecer la ruptura de la placa a lo largo de la ruta del Esquiador. En cambio, en el caso de placas más resistentes, puede que el umbral de ruptura, es posible no se cumpla. En este caso, el Esquiador puede estar en la zona peligrosa sin haber provocado la Avalancha, si la ruptura de la capa frágil evoluciona brutalmente en modo B (espontáneo) (ver abajo).



b. Desencadenamiento modo B

Reconocemos ahora una placa mucho más resistente, o una placa más pesada. La zona de ruptura puede mientras alcanzar el tamaño crítico para el modo B antes de que una fisura somital no haya dado tiempo de abrirse. A partir de fase, que se propague a una velocidad mucho más rápido. La fisura somital se abre poco después, a menudo a una gran distancia del Esquiador, cuando el peso de la parte libre de la placa ha pasado a ser lo suficientemente grande para superar la resistencia de la placa. La zona de partida es mucho más amplia que en el primer caso, y el Esquiador se encuentra situado en medio de esta zona. En determinadas





condiciones, la apertura de fisura somital podrá ir acompañada de un “bum” impresionante, del que hemos sido varias veces testigos.

Un simple cálculo demuestra que este modo de activación es favorecido en las laderas vecinas de un ángulo universal de $35,3^\circ$.

LAS PIEZAS DE LA VARIABILIDAD

Los distintos casos posibles de activación dependen de la variabilidad de las propiedades de la nieve, que se encuentren en las cuatro etapas del proceso. Por ejemplo, en la hipótesis superior, una espesa capa de nieve puede fomentar la ampliación de la ruptura de la capa frágil. Pero el inicio de la ruptura de la capa frágil por un Esquiador resulta imposible si la placa afectada es demasiado gruesa.

Sin duda esto es consecuencia:

- Los desencadenamientos accidentales son más frecuentes al inicio de invierno (placas delgadas en capas frágiles) ;
- los Esquiadores pueden cruzar sin problema una ladera fuertemente cargada, y no provocar la Avalancha en el momento en que salgan, donde el espesor de nieve cubre la capa frágil situada a un nivel inferior;
- los excursionistas rompen algunas veces la placa justo después de haberse quitado sus esquís (la presión ejercida es fuerte, para un mismo grosor de nieve).

El tipo de ruptura que el Esquiador deja, en su paso puede variar, por ejemplo en el caso de la figura 3a a la de figura 3B, o peor aún, de la figura 3C. Esto será el caso, por ejemplo si se pasa por una zona de nieve poco cohesionada a una placa más cohesionada. Otro ejemplo es el de un crecimiento gradual (modo A) de la zona de rotura bajo una placa poco gruesa (figura 3B), que puede cambiar rápidamente en expansión espontánea rápidamente (método B) (figura 3C) si la placa pasa a ser más gruesa en las inmediaciones (Figura 7). Este último caso es especialmente difícil para los montañeros experimentados, que están atentos al tipo de nieve bajo sus esquís, pero pueden descuidar el peligro de su variabilidad en la proximidad: una pendiente que parece segura puede ser repentinamente barrida por una avalancha de gran magnitud.



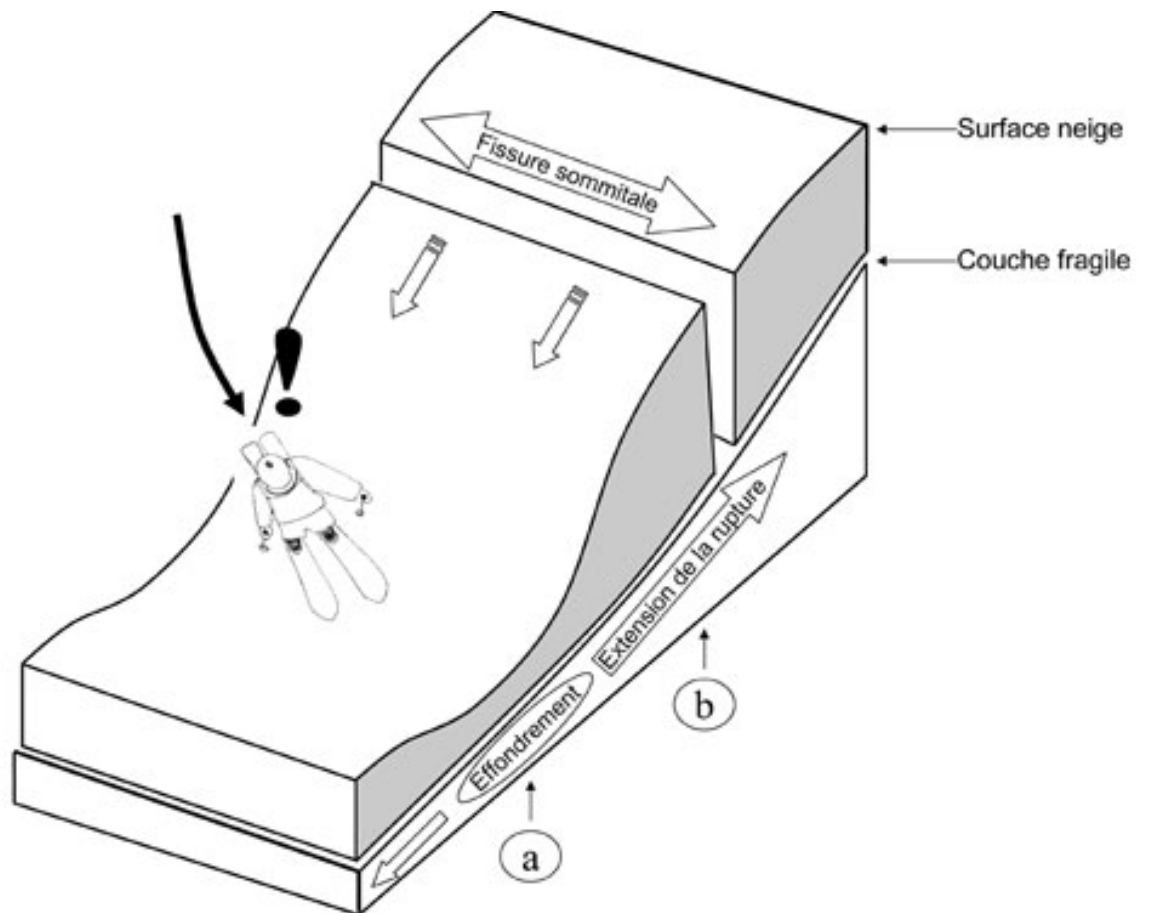


Figura 7: La situación es particularmente peligrosa cuando una zona poco cargada de nieve (favorable a la iniciación de rotura la capa frágil) es continua con una zona mucho más cargada (favorable a la propagación de la ruptura en MB B). Se observa frecuentemente como fisuras somital se abren (etapa 3) hacia zonas con rocas, un árbol, una huella de esquí o de surf. Estas Heterogeneidades son los puntos débiles en la placa, que favorecen el inicio. Un fenómeno similar puede producirse en convexidades.

Estos puntos débiles pueden desempeñar un papel doble:

- Facilitan el estallido gracias a la apertura de la fisura somital.
- Pero que impiden la propagación a gran escala de la zona de ruptura, que habría conducido a la desestabilización de grandes placas. En otras palabras, de grandes zonas de salida se esperan en ladera amplias y sin puntos débiles (Heterogeneidades de terreno, árboles, rocas dispersos o Afloramientos).

Los Esquiadores entrenados a veces llegan a desencadenar aludes de placa sin riesgo para ellos. “Cortar las placas” era una técnica normal para la Seguridad antes del uso generalizado del estallido preventivo mediante explosivos.





En la mayor parte de los casos, se trata de un estallido de tamaño limitado (modo A): el esfuerzo de tracción resultante de la ruptura de la capa frágil sobre una superficie limitada, es suficiente en este caso para abrir una brecha somital que desencadene la Avalancha, Pero el Esquiador puede escapar si es capaz de controlar su trayectoria. Esto es lo que ocurre en el caso de placas poco inclusivas y poco gruesas. Sin embargo, sobre una misma pendiente, puede suceder que una Avalancha supere ampliamente el tamaño « habitual". Se trata al de un estallido en modo B, y cuyas consecuencias son generalmente de naturaleza fatales. Esta hipótesis es más probable en el caso de nieve pesada e integradora, (Esta propiedad que pueda resultar de las superposiciones de varias capas a los que variadas). Es interesante para los practicantes de estar al corriente de la existencia de estos dos modos de activación. Se debe saber que es muy difícil y peligroso predecir cual de los dos tipos se puede producir, aunque el modo B es más habitual con una capa frágil continua, y que se encuentre recubierta por una nieve pesada, gruesa y resistente, con pendientes cercanas a los 35°.

CONCLUSIONES

Si el concepto de desequilibrio por sobrecarga puede aplicarse en algunos casos de aludes espontáneas, este no es el caso para los aludes accidentales, ya que ello supondría que la mayoría de las laderas nieve están tan cerca del punto de ruptura que bastaría con una gota de agua más que el peso del Esquiador para provocar el desencadenamiento de este fenómeno.

A pesar de la gran variedad de fenómenos avalanchosos observados, la comprensión de cada caso particular puede, en el marco de un modelo único donde se produzcan las cuatro etapas sucesivas, ser analizado en base a los conceptos de la dinámica de la ruptura más que del equilibrio estático. Todas estas fases deben producirse una tras otra para que se produzca la avalancha, si una sola falla, la Avalancha no se produce. Este escenario parte de un daño puntual de la Capa frágil, seguido o no de su propagación, que puede conducir a la ruptura somital de la placa.

La diferencia esencial, entre los modos A y B que se deriva en que se pueden explicar la gran variedad de tipos y tamaños de avalanchas obtenidos en condiciones aparentemente similares.





Sin embargo, este enfoque no permite explicar todos los fenómenos que se producen. Hay que recordar el problema conocido del “Efecto Mariposa”: aunque las leyes de mecánica de la ruptura de activación sean ya conocidas, los distintos estratos de nieve son un sistema tan complejo, que una predicción Determinista del lugar y el momento exactos del desencadenamiento de una Avalancha es imposible, por mucho que se conozcan la formación y las propiedades de la nieve.

Con esto queremos decir que es no sirve de nada de conocer todas las formas de desencadenamiento, no todas se pueden prever.

Un avance notable ha sido poner en una misma cesta toda la estadística general de las zonas de estudio y sus modelos teóricos por llamadas automáticas celular por los Sres. Faillettaz, Louchet y Grasso (2004). La aplicación de estas simulaciones las topografías especiales debería permitir afinar las previsiones.

Mientras tanto, creemos que los conceptos desarrollados en este artículo podrán proporcionar ayuda en la toma de decisiones de profesionales y usuarios de la montaña nevada, a través de una mejor comprensión de los mecanismos básicos.

