

# **Les Vagues Induites Par Les Inondations Sont-Elles Une Réalité ?**



photographie d'un mascaret sur la Gironde.

### Remerciements :

- A M.JOUANNEAU pour m'avoir guider sur les grandes lignes de ce rapport.
- A la formation IMACOF pour son accès à internet.
- A la faculté des sciences de Nantes pour ses ouvrages.
- A IFREMER Nantes et surtout la bibliothécaire pour sa grande patience.

# **Sommaire :**

Introduction :

- I. Le déferlement des vagues marines :
- II. Le mascaret :
- III. Les laves torrentielles :
- IV. Les différentes ondes pouvant donner naissance aux vagues :

Conclusion :

## **Résumé :**

Ce rapport a pour vocation d'apporter des éléments concernant les vagues induites par les inondations. Il commence par une première partie consacrée aux vagues maritimes afin de définir ce qu'est une vague. Viennent ensuite les analogies avec le mascaret dans un premier temps qui présente réellement le phénomène de vague. Puis, la comparaison est effectuée avec les laves torrentielles qui sont des écoulements hyper-concentrés et présentant un front qui est susceptible de déferler. Enfin, il sera lieu d'étudier les ondes en surface libre, qui sont elles aussi susceptibles de créer des vagues dans certaines conditions.

Mots clefs : onde, lave torrentielle, vague, déferlement, mascaret, crête, longueur d'onde, front vertical, célérité de propagation, loi de comportement, mécanique des sols.

## **Summary :**

This document tries to prove the existence of flood's wave phenomena. In a first time, we'll see vocabulary and formation of sea's waves to define this phenomena. After that, we'll try to make an analogy with the tidal wave in estuary, which is a real wave spreading in river. Then, the comparison occurs with debris flow, which is a high-load flow and present a front apt to break. Lastly, we'll see river's undulations which are sometimes able to create waves.

Key words : undulation, debris flow, wave, to break, tidal wave, peak, wavelength, upright front, spreading velocity, behaviour's law, ground's mechanical.

## **Introduction :**

**Vague** : soulèvement local, plus ou moins volumineux, de la surface d'une étendue liquide dû à diverses forces naturelles ( vent, courant, etc... ) ; masse d'eau ainsi soulevée, au moment où elle déferle sur un rivage.

*Dictionnaire de la langue française, édition Hachette*

Cette définition, bien qu'étant assez vaste apporte un élément crucial à la problématique de cet exposé : une vague est une masse d'eau qui déferle, ce qui induit aussi la formation d'un front vertical.

Mais cette masse d'eau est-elle une ondulation de la surface libre, la résultante de plusieurs de ces ondulations, ou bien une brusque et importante accumulation d'eau provoquant la genèse d'un front vertical qui déferle comme c'est le cas pour la rupture d'une digue ou d'un barrage ?

Si une telle vague existe, quels sont les mécanismes qui en sont à l'origine ? S'agit-il d'un facteur tel que le vent, les frottements sur le fond, un obstacle induisant le déferlement progressif, un goulot d'étranglement ou bien une combinaison de ces différents éléments ?

Le but de cet exposé n'est pas de prouver l'existence du phénomène de vague induite par les inondations, mais plutôt d'apporter des éléments de réponse afin de mieux appréhender ce problème.

Il sera donc lieu dans un premier temps de définir le phénomène de déferlement, pour lequel l'analogie est réalisée avec les vagues maritimes, puis de comparer l'existence du phénomène de vague induite par les inondations avec ceux du mascaret et des laves torrentielles, puis enfin d'aborder les différentes ondes à la surface libre d'un cours d'eau qui pourraient être susceptibles de déclencher un tel phénomène.

# **I. Le déferlement des vagues marines :**

## **1. Les facteurs de formation :**

Ce type de vague est issu des ondes de marées que l'on appelle aussi 'houle' ( dont l'existence provient de différents facteurs : vent, courants, mouvements géodésiques,... ), une brève explication de la formation de ces vagues pourrait nous amener à mieux appréhender le phénomène de vagues induites par les inondations.

Soit deux crêtes de vagues, séparées d'une distance  $L$  aussi appelée longueur d'onde, de célérité  $c$ , de hauteur  $h$  et de période  $T = L/c$ .

Le rapport  $h/L$  donne ce que l'on appelle la cambrure de la vague, qui si elle dépasse une certaine valeur ( $1/7$  en général) provoque le déferlement, il est évident que cette valeur varie en fonction du type d'onde, du vent, et même de la morphologie du fond.

Néanmoins, il ne s'agit pas du seul facteur ; le frottement de la base de la lame d'eau sur le fond intervient en ralentissant les déplacements, le profil de la vague tend ainsi à prendre une forme asymétrique, ce qui contribue au déferlement.

Ce phénomène peut aussi se produire par une accélération locale du vent ou par une opposition du sens de la vague à la direction du courant (ce qui provoque une diminution de la longueur d'onde et de la vitesse contre une augmentation de la hauteur).

## **2. Les différents types de déferlement :**

Il existe plusieurs types de déferlements en fonction de la pente rencontrée :

- Déferlement glissant : sur un fond à faible pente, la vague s'écroule en glissant sur sa face avant.
- Barre : sur un fond plus incliné la crête bascule en formant des rouleaux.
- Déferlement frontal : sur un fond très incliné, on observe une écume à mi hauteur de la vague qui bouillonne.

Le déferlement d'une vague est donc la résultante de l'un ou de plusieurs de ces facteurs qu'il serait intéressant de tenir en considération pour l'approche de l'existence du phénomène de vague induite par les inondations.

### 3. Les trains d'ondes :

Les vagues sont rarement isolées, on observe qu'un train de vagues se propage avec une vitesse donnée, alors que chacune de celles qui le composent voyage à une vitesse plus grande que celle du groupe.

Tout au long du mouvement, des vagues naissent à l'arrière, dépassent les autres et viennent s'épuiser à l'avant. De sorte qu'un train composé d'un nombre donné de vagues, comme on peut les compter sur une photographie, paraît compter un nombre plus grand pour un observateur immobile qui les compte au passage.

Un groupe d'ondes, en eau profonde, est formé de vagues d'amplitudes et de vitesses différentes. Ce qui s'explique en mathématique par une intégrale de Fourier, et le mouvement saisi à un instant donné se compose de groupes de vagues dont l'amplitude varie comme une sinusoïde (Cf figure 1).



figure 1 : schématisation d'un train d'ondes (NORDON)

Les longueurs d'onde sont aussi différentes, et un phénomène auquel on a donné le nom de 'dispersion' résulte du fait que la vitesse de chaque vague est fonction de sa longueur d'onde.

Rayleigh a démontré que la vitesse moyenne du groupe correspond à peu près à la moitié de celle de chaque vague, selon des considérations énergétiques.

En 1970, la formule donnant la vitesse démontre que les vagues de plus grandes amplitudes ont les plus grandes vitesses, ainsi si une vague de petite amplitude se trouve devant une de grande amplitude, cette dernière se rapproche, paraît absorber la petite dans une agitation mal définie, puis la dépasse et l'une et l'autre se retrouvent avec leurs vitesses propres, intacts.

## **II. Le mascaret :**

Le mascaret est une manifestation rare des marées fluviales. Le mot ‘mascaret’ a pour origine le nom du petit village de S<sup>t</sup> Macaire, sur la Garonne, point le plus en amont où se produisait le phénomène.

### **1. Les marées fluviales :**

Les marées fluviales présentent un caractère complexe par rapport aux marées maritimes, ce qui est notamment dû à la faible profondeur, aux variations de la morphologie, et au couvert végétal du lit.

De façon générale, le fleuve est parcouru par une onde progressive, engendrée par la marée de la mer où il se jette. Cette onde a pour vitesse théorique :

$$C = (g.(h+z))^{1/2} - v$$

g :accélération de la pesanteur

h :hauteur d'eau

z :côte du fond

v :vitesse du courant liée au fleuve.

On constate que la vitesse est indépendante de la longueur d'onde

Contrairement aux marées de mer, on ne peut pas négliger la variation de profondeur due à l'onde elle-même, ce qui a pour conséquence de déformer l'onde au cours de sa propagation, celle de la pleine mer se propageant plus vite que celle de la basse mer.

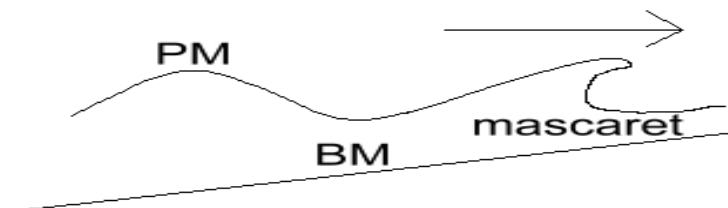


figure 2 : schématisation d'un mascaret (web11)

Cette différence couplée à la conservation de l'énergie (la forme en entonnoir de l'estuaire provoque une convergence de l'onde de marée) amène une augmentation de l'amplitude ( $z$ ) et une chute de la profondeur ( $h$ ) (qui est la conséquence de l'exhaussement du lit du fleuve par rapport au niveau marin) au fur et à mesure que l'onde se déplace vers l'amont (la fonction  $z.(h)^{1/2} = \text{constante}$ ).

Néanmoins, l'exhaussement du lit du fleuve, les frottements sur le fond (dont on observe le maximum en basse mer), ainsi que la viscosité produisant des remous ; contribuent à diminuer cette amplitude.

Si en plus l'embouchure est encombrée de bancs, l'amortissement est alors considérable et l'amplitude chute dès le début comme c'est le cas pour la Seine.

On peut noter que pour la plupart des fleuves, la surélévation et le frottement entraînent l'extinction de l'onde à une distance de l'embouchure qui est inférieure à la moitié de la longueur d'onde.

De sorte qu'il n'y ait jamais simultanément pleine et basse mer en deux points du fleuve. (l'Amazone en est un contre exemple étant donné que la marée se fait ressentir sur 1500 km, et sur lequel la hauteur du mascaret peut atteindre 6m et se propager sur 800 km).

L'étude des marées fluviales est complexe du fait que les frottements et la viscosité déforment l'onde, il faut en plus y ajouter les réflexions sur les rives et même l'action de rotation de la terre.

Leur prédiction résulte surtout de l'expérience et se fait à l'aide d'un tableau donnant le profil instantané de l'onde à chaque heure en fonction du coefficient de marée.

## **2. Les mécanismes du mascaret :**

Le mascaret correspond à la brusque élévation du niveau de la mer qui se produit à l'embouchure de certains fleuves encombrés de bancs sédimentaires, au moment où la mer commence à monter.

Il semble que les vagues à marée montante, se succédant très rapidement, viennent se heurter sur ces bancs. Leur vitesse se trouve subitement et momentanément ralentie, ce qui les rapproche et les tend à se jeter les unes contre les autres « comme le feraient les rangs



successifs d'une charge de cavalerie qui rencontrerait subitement un obstacle inopiné. » (Lévy).

Le mascaret se manifeste de la façon suivante :

« Lorsque le flot arrive à l'embouchure du fleuve, la mer commence à monter dans les passes les plus profondes. Sur les bords de celle où la profondeur est moindre, on aperçoit une vague dont l'extrémité parcourt la rive en déferlant, et qui se prolonge, généralement sans briser, vers le milieu de la passe.

Dans les endroits peu profond et sur les bancs c'est une longue lame qui déferle et qui s'avance comme une ligne blanche ; c'est un rouleau d'eau qui précède le flot et qui en est pour ainsi dire la tête.

Ce rouleau est suivi de plusieurs vagues dont les premières sont seules écumantes et qui diminuent progressivement de hauteur. Ces vagues sont connues sous le nom d'*Eteules* sur la Seine.

Le mascaret est toujours suivi d'un exhaussement subit et persistant du niveau d'eau. »

(J.ROUCH )

En des termes plus simples, un mascaret se forme car :

- La marée montante est retardée par le courant de la rivière.
- La marée monte par paliers de 5 à 10 cm.
- Le niveau d'eau est faible, les paliers se rattrapent et forment les vagues constituant le mascaret.



***"Le flot arrive, le flot arrive! Reculez!" hurlait le haut-parleur. Mais ceux qui ignorent la soudaineté et la violence du mascaret ne crurent pas ces sages conseils. La vague monta, déferla, balaya le quai et une bonne vingtaine de spectateurs qui, la prochaine fois, prendront un peu plus de recul.***

Figure 3 : photographie d'un mascaret de Pâques  
a valu à Caudebec-en-Caux,1958 (web17)

La formation d'un mascaret peut se schématiser de la façon suivante :

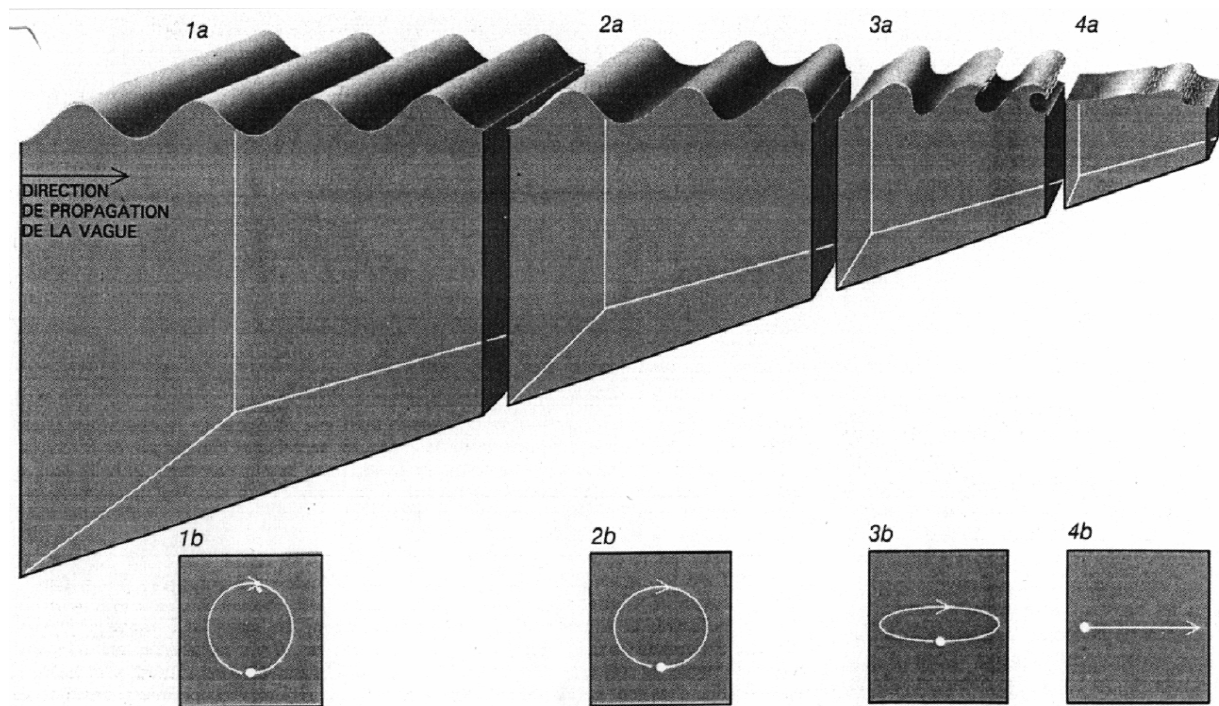


figure 4 : ("pour la science" décembre 1982 n° 62 page 56) (web11)

#### 1<sup>ère</sup> étape : au large

(1a) : les vagues sont symétriques en eau profonde, c'est à dire que les 2 côtés de la vague ont la même pente, les crêtes et les creux se déplacent à la même vitesse.

(1b) : la trajectoire des particules d'eau est alors circulaire. La vague transporte de l'énergie mais son passage n'entraîne aucun transport d'eau vers l'avant.

#### 2<sup>ème</sup> étape : au niveau de l'estuaire

(2a) : les vagues, en eau peu profonde, commencent à interagir avec le fond en pente douce, ce qui se traduit par une réduction de la longueur d'onde. Les crêtes sont plus profondes que les creux, et étant donné qu'ils se déplacent alors plus rapidement, elles finissent par les rattraper. C'est ainsi que les vagues deviennent asymétriques.

(2b) : les particules d'eau ont une trajectoire aplatie en ellipse.

### 3<sup>ème</sup> étape : phase finale

(3a) : lorsque la hauteur de la vague dépasse de moitié la profondeur, la crête déferle alors dans le creux.

(3b) : la trajectoire des particules d'eau est encore plus aplatie que pour la phase précédente.

(4a) : la conjonction de ces phénomènes forme alors une muraille d'eau turbulente : le mascaret.

(4b) : les particules d'eau ont une trajectoire linéaire.

### **3. Les conditions de formation :**

Plusieurs conditions sont nécessaires pour permettre l'apparition d'un mascaret :

- le coefficient de marée doit être supérieur ou égal à 100.
- Le débit du fleuve doit être assez faible pour permettre que la vague ait une bonne puissance.
- La morphologie du fleuve doit se rétrécir progressivement pour ne pas ralentir le mascaret.
- Le fond du fleuve doit remonter en pente douce afin d'éviter un ralentissement (par exemple, la dénivellation de la Seine est seulement de 26m entre Paris et la mer).
- Si le vent souffle dans la même direction que le sens de propagation du mascaret afin de le renforcer ou même de l'accélérer.
- La pression atmosphérique doit être assez faible pour permettre une bonne expression de la puissance du mascaret.

### **4. Caractérisation :**

Du point de vue hydrodynamique, on peut considérer le mascaret comme un intermédiaire entre un écoulement sous critique (la vitesse d'écoulement des particules d'eau est inférieure à la vitesse de la vague en eau peu profonde) et un écoulement supercritique (la vitesse d'écoulement des particules d'eau est supérieure à la vitesse de la vague en eau peu profonde).

L'analyse du nombre de Froude, qui correspond au rapport entre la vitesse du mascaret et la vitesse des vagues d'eau peu profondes, permet de déterminer le type d'écoulement du mascaret.

- $1 < F < 1.7$  : le mascaret est ondulant.
- $F > 1.7$  : le mascaret est déferlant.



figure 5 : photographie d'un mascaret déferlant(web14)

Le mascaret est constitué d'un train de vagues analogue à ceux de la houle. Il y en a généralement 4 à 5 grosses pouvant atteindre 2,5 m de hauteur, espacées d'environ 10 m. Elles sont suivies par une zone très mouvementée. (cf figure 6).



figure 6 : photographie montrant un mascaret sur la Gironde(web14)

La vitesse des vagues en fonction de la hauteur de crête :

- Pour une hauteur de 1m, la vague défile à 3m/s soit 10 km/h
- Pour une hauteur de 4m, la vague défile à 6m/s soit 20 km/h

En France le mascaret existait sur de nombreuses rivières : Charente, Seine, Gironde, Garonne... Il a totalement disparu sauf en Gironde.

Par exemple, celui de la Seine était très meurtrier mais il a bénéficié d'un aménagement spécialisé afin d'éviter de nouveaux décès. On peut également noter que la mort de la fille de Victor Hugo, Léopoldine, est une des conséquence de cette vague déferlante sur les rives.



Figure 7 : Photographie montrant un mascaret sur la Seine(web13)

Les travaux d'endiguement, et les dragages successifs sur la Seine pour la construction du Chenal de Rouen ont fait disparaître le mascaret dans ses aspects spectaculaires en 1963, l'estuaire n'ayant plus une forme en entonnoir.

Il ne reste que très peu de mascarets en raison des aménagements réalisés dans les estuaires. En France, subsistent les mascarets de la Durance et de la Garonne.

### **III. Les laves torrentielles :**

#### **1. Qu'est ce qu'une lave torrentielle ?**

L'écoulement d'eau sur un fond mobile peut se charger de sédiments, un mélange Eau / sédiments modifie l'écoulement mais aussi le fond du lit, donc sa cote, sa pente et sa rugosité.

L'un des paramètres caractéristiques de ce mélange eau/sédiments est la concentration en particules solides ( $C_s$ ).

Un mélange se comporte comme non newtonien si  $C_s > 8\%$ , la différence entre la densité du mélange et celle de l'eau avoisine  $130 \text{ kg/m}^3$ .

L'écoulement d'un fluide non newtonien modifiera tous les concepts de l'hydraulique newtonienne, notamment la résistance à l'écoulement ainsi que la répartition des vitesses et de la concentration. La vitesse de sédimentation est également influencée et les particules solides restent plus longtemps en suspension.

« Le transport de sédiments en hyperconcentration, les écoulements torrentiels de débris-lave (rocheux boueux), ainsi que les courants de turbidité hyperconcentrés entrent dans cette catégorie.

- Le transport des sédiments en hyperconcentration s'établit dans les cours d'eau à faible pente qui reçoivent d'énormes quantités de sédiments (de taille relativement petite), pendant la saison des pluies provenant de l'érosion superficielle du bassin versant. Souvent les particules solides restent longtemps en suspension.
- Les écoulements torrentiels de débris-lave s'établissent sur la pente du fond raide  $> 15^\circ$ . Toutes sortes de particules, de la plus fine (avec cohésion) à la plus grossière (gros blocs excédant  $1 \text{ m}^3$ ), participent à ce mouvement, d'ailleurs rare et de courte durée, provoqué par de fortes précipitations. »

(GRAFF)

Dans la plupart des cas, les laves formées sont boueuses, composées de matériaux fins incluant les matériaux grossiers. Ces matériaux grossiers peuvent avoir un rôle important dans ce torrent, en particulier à cause de la taille extrême des blocs transportés. Une telle lave est usuellement formée de trois parties :

- Le bourrelet frontal constitué des plus gros blocs, généralement en contact direct. Ce bourrelet frontal présente une section très importante. Il est poussé par le corps de la coulée. Les blocs les plus imposants sont généralement en arrière immédiat du bourrelet frontal. Des blocs de plus d'une centaine de tonnes ont été déplacés lors des récentes crues.
- Le corps de la coulée qui est constitué d'un mélange boueux homogène. Il joue un rôle moteur dans le déplacement de la coulée.
- La queue de coulée dans laquelle on peut observer un charriage hyperconcentré. La section d'écoulement est alors nettement plus réduite.

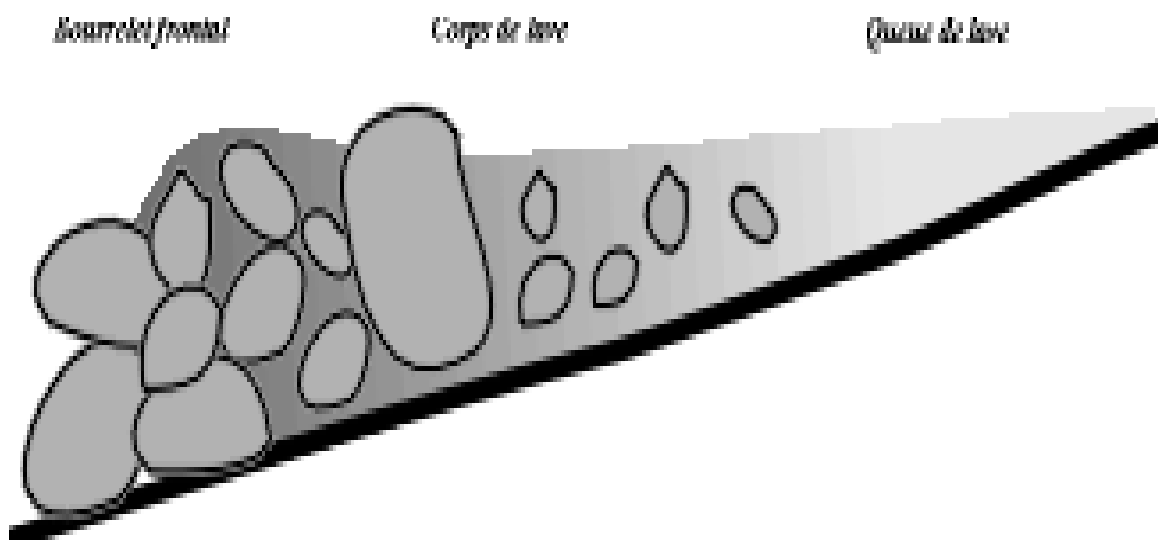


figure 8 : Structure longitudinale d'une lave torrentielle (Web4)



## 2. Caractéristiques physiques des laves :

- Vitesse : elle varie de 0.5 à 10 m/s, surtout en fonction de la pente.
- Hauteur du front : elle peut atteindre 11m, en fonction des caractéristiques des matériaux. De plus, la hauteur augmente avec la viscosité.
- Viscosité : elle est très élevée et augmente avec la teneur en matériaux solides, on a donc un gradient positif de viscosité de la queue vers le front. On y trouve très souvent des blocs dont le diamètre est supérieur à 1m.
- Masse volumique : elle dépend de la concentration et oscille entre 1900 et 2650 kg/m<sup>3</sup>.
- Volume : il est fonction de la taille du bassin versant, et varie de 10 000 à 100 000 m<sup>3</sup>
- Formation du front : étant donné que c'est la partie boueuse qui est en contact avec le sol, les gros blocs (qui ont plus d'inertie) ont une vitesse plus rapide que le mélange, et se déplacent vers le front de la lave.
- Tri granulométrique : il est tout simplement absent dans les dépôts.
- Etalement : il se limite à la formation des bourrelets latéraux.

Tableau 1 : caractéristiques physiques des laves torrentielles

	volume	vitesse	masse volumique	concentration volumique solide	hauteur	seuil de contrainte
gamme de variation probable	10 000 à 100 000 m <sup>3</sup>	1 à 7 m/s	1900 à 2650 kg/m <sup>3</sup>	53 à 97%	0,5 à 5 m	500 à 10 000 Pa
lave torrentielle 'typique'	25 000 m <sup>3</sup>	4m/s	2400 kg/m <sup>3</sup>	77%	2,5 m	1500 Pa

### 3. Les deux types de laves torrentielles :

Cette différence est basée sur la proportion et le type des particules, néanmoins le facteur fondamental est la concentration des particules fines, c'est-à-dire les limons et argiles de la lave.

#### a) Les laves torrentielles boueuses :

Le mélange contient une grande fraction de particules fines (>10% de l'ensemble des particules). Le fluide interstitiel lubrifie les mouvements relatifs des grains grossiers et impose son comportement.

Un échantillon sec sur le terrain, lorsqu'il est mélangé avec un peu d'eau retrouve l'aspect d'un fluide homogène et visqueux. Si on augmente la teneur en eau, le mélange reste d'abord homogène puis les processus sédimentaires apparaissent.

Les dépôts secs sont très rigides ,ce phénomène est dû à la cohésion des particules argileuses,ils se présentent alors sous forme de lobes.

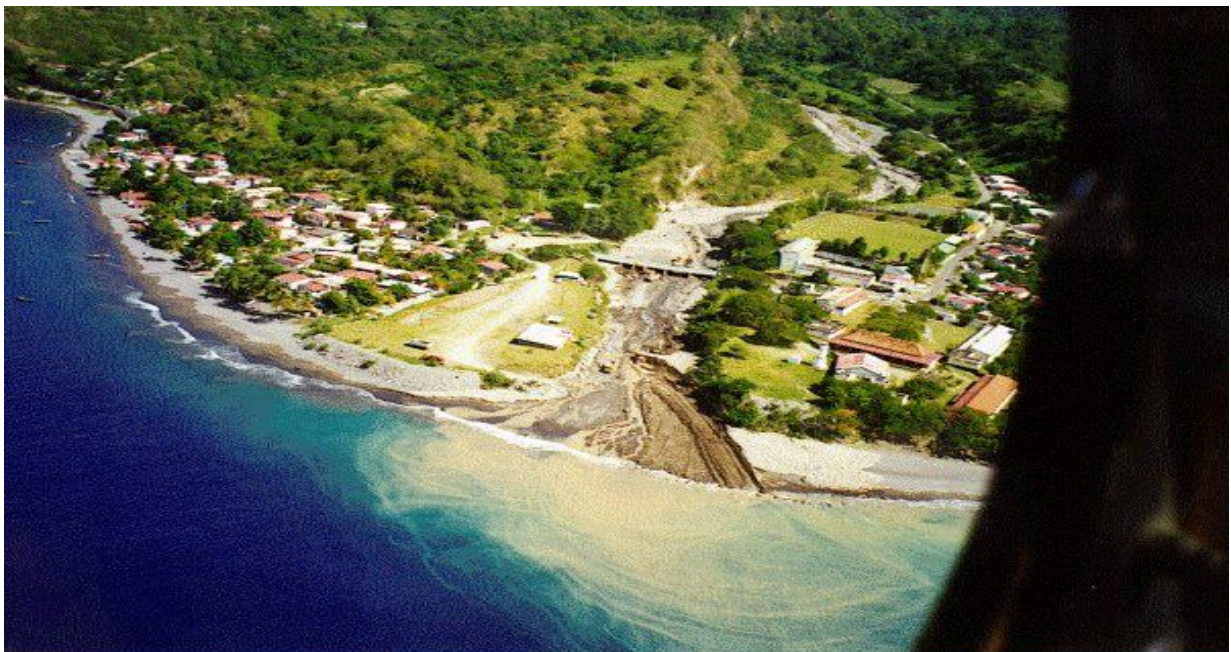


Figure 9 : photographie de la rivière du Précheur (Martinique) montrant que les laves torrentielles sont constituées d'une fraction de particules fines.(Web1)

b) Les laves torrentielles granulaires :

La fraction argileuse est très faible ( $<1\%$ ), elle ne représente plus le 'ciment' de la lave, les contacts entre les grains sont nombreux et gouvernent le comportement mécanique de l'ensemble.

Les dépôts secs mélangés avec l'eau forment un fluide homogène avec une seule concentration solide, seulement lorsqu'on arrive à saturation. Les dépôts secs sont très friables et s'effondrent facilement du versant.



Figure 10 : photographie d'une lave torrentielle granulaire.

Tableau 2 : principales caractéristiques distinctives des laves torrentielles boueuses et granulaires

	mélange avec l'eau	état de la surface	forme des dépôts
laves boueuses	plusieurs concentrations possibles	mou juste après la coulée rigide après séchage	le front des lobes incurvés est dans le sens de la coulée
laves granulaires	une seule concentrations : la saturation	très friable mais résiste bien à l'enfoncement	lobes difficilement identifiables les lobes suivent le profil des dépôts droits

#### **4. La formation des laves torrentielles :**

La génèse des laves torrentielles implique que plusieurs facteurs soient réunis :

- Le terrain doit avoir subi plusieurs facteurs mécaniques et chimiques susceptibles de d'apporter une décohésion du substrat.
- Cette décohésion par phénomène chimique doit s'accompagner d'une forte quantité d'eau.
- Un mélange homogène de substrat et d'eau pour le corps de la lave.

##### a) Les facteurs de décohésion du substrat :

Dans la plupart des cas, ces laves sont formées en montagne, on y trouve des matériaux glaciaires et primaires (schistes et grès) qui sont imbibés d'eau.

Cette action est la résultante des transformations mécaniques des roches (fissuration, fracturation, broyage, érosion par l'alternance gel / dégel) et à l'altération physico-chimique superficielle et profonde. (cf annexes 2).





figure 11 : niche d'arrachement dans les calcaires dolomitiques délimitant le bassin de réception du torrent de l'Ilbach. Chandolin (Web3)

Ainsi, l'imprégnation de l'eau et l'écoulement hypodermique est possible, celui-ci peut être à l'origine d'un colmatage et donc d'une mise en charge. Le phénomène est aggravé par la déstabilisation des sols, l'arrachement de l'humus superficiel et l'érosion du pied du versant.

En surface ou en profondeur, une matrice visqueuse est donc créée, la mise en mouvement se fait lentement par fluage ou brutalement par rupture de poches colmatées et en charge.

#### b) La formation par accumulation de matières :

Cette lave, ainsi préparée est constituée d'un volume initial assez réduit, de l'ordre du  $m^3$ . Elle subit alors une succession de blocage par rupture de pente ou rencontre d'un obstacle sur le versant.

Derrière ce barrage de gros blocs, la lave s'accumule et la rupture a lieu lorsque la limite de résistance du barrage est atteinte. Les éléments sont entraînés et la coulée initiale augmente de volume par les apports des coulées affluentes et par érosion.

Il se forme un mélange homogène par brassage avec l'eau. S'il y a un surcroît d'eau, il y a ségrégation du mélange, l'écoulement devient alors hyper concentré.



figure 12 : photographie montrant un sillon laissé par le passage d'une lave torrentielle

### 5. Les différents modes de déclenchement de la coulée :

Trois modes de déclenchement sont possibles :

a) Les laves provoquées par un glissement de terrain :

Sous l'effet d'un facteur déclenchant tel que la rupture en pied de glissement, une surcharge ou une augmentation de la pression interstitielle, la masse de terrain en déséquilibre s'accélère. Les laves forment alors un fluide boueux par addition d'eau

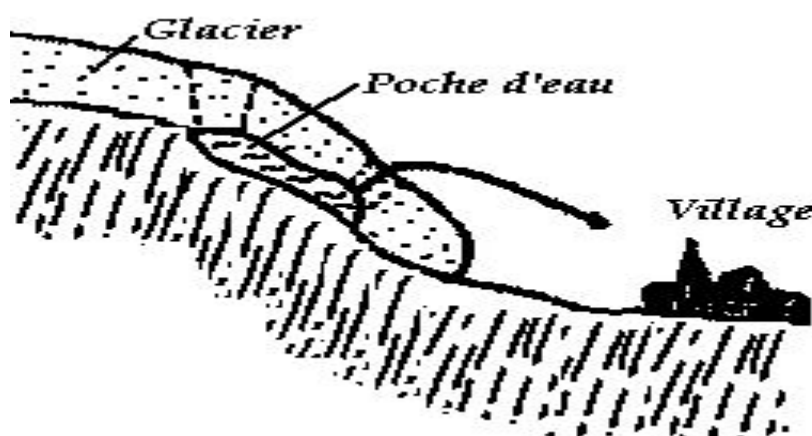
b) Les Laves à genèse hydrologique :

Dans ce cas, l'érosion s'effectue sur tout le bassin versant. Effectivement, lors des grosses pluies, l'eau dispose d'une énergie cinétique importante, ce qui se traduit par une capacité érosive lui permettant de se charger en particules jusqu'à l'obtention d'un écoulement hyper concentré.

Sur les fortes pentes où des glissements de berges sont possibles, l'écoulement peut alors se transformer en lave torrentielle.

c) Les laves provenant de débâcle glacier :

Il s'agit dans ce cas de la rupture d'une poche d'eau située à l'intérieur du glacier, ce qui est indétectable de l'extérieur. Elles peuvent être soit intra-glaciaires, c'est-à-dire situées dans l'épaisseur même du glacier, soit sous-glaciaires, c'est-à-dire en contact à la fois avec le glacier et le lit. Les ruptures de ces poches causent des catastrophes souvent meurtrières du



fait de leur soudaineté, de leur imprévisibilité, et de l'importance des laves torrentielles qu'elles sont en mesure d'engendrer.

On ne connaît pas avec précision les conditions qui conduisent à la formation d'une poche d'eau, et ce bien qu'il soit indéniable que les conditions morphologiques du site où elle prendra naissance jouent un rôle très important ; en effet, c'est quasiment toujours autour d'un ressaut morphologique, là où le glacier a tendance à se décoller de son lit, que les poches sous-

glaciaires apparaissent. En ce qui concerne les poches totalement intra-glaciaires, il n'existe que trop peu d'éléments pour pouvoir en déterminer l'origine avec précision.

Figure 13 : schéma montrant le mécanisme du débâcle glacier(Web7).

Une fois le vide créé (à l'intérieur ou sous le glacier), il y a accumulation d'eau provenant de la fonte des neiges au printemps, de la fusion estivale de la glace ou bien des précipitations qui s'infiltrent dans le glacier ; cela conduit à un agrandissement de la poche. Lorsque la pression à l'intérieur de la poche est trop importante pour que la glace résiste, il y a expulsion d'un bouchon de glace, et vidange brutale de la poche d'eau.

La partie du glacier qui recouvrait la poche d'eau en amont se trouve alors déstabilisée, du fait du vide créé en dessous et il y a souvent effondrement de la voûte. La débâcle (écoulement d'eau mélangée à de la glace) ainsi produite, peut conduire à la formation d'une lave torrentielle ou d'une coulée de boue, s'il y a suffisamment de matériaux mobilisables sur les zones de passage du flot (moraines, terrains meules...).

## **6. Quantification et qualification de l'écoulement des laves :**

### **a) Ecoulement :**

L'écoulement s'effectue de façon alternative, par des bouffées très brèves, c'est-à-dire par des phases d'arrêt pendant lesquelles le corps de la lave 'fait gonfler' le bourrelet frontal (qui est composé de gros blocs, d'arbres et de débris divers) lors des obstructions, le poussant ainsi à dévaler la pente.

Sur les pentes très raides, la seule force de gravité suffit à provoquer l'écoulement de la lave.

On peut observer des bourrelets latéraux, provenant du bourrelet frontal principal, et qui se déposent au fur et à mesure de l'avancement de la coulée

Le corps de la lave est constitué d'un mélange visqueux et de blocs formant un fluide de forte densité. Le passage de cette coulée a une forte capacité érosive sur le lit du cours d'eau, mais il peut également en combler les irrégularités tels que les creux.



L'immobilisation se fait au niveau d'une rupture de pente ou sur le cône de déjection. Le bourrelet frontal de la première coulée s'immobilise sur une rupture de pente ou contre un

obstacle. La coulée gonfle derrière celui-ci puis s'épanche latéralement, elle peut atteindre le lit de l'Arc car elle est plus fluide.

b) la reprise du mouvement :

Le fait que la lave se fige rapidement par essorage des matériaux exclut très souvent une reprise de l'écoulement lorsque ce phénomène se couple à une pente trop faible pour permettre l'écoulement.

La seule reprise qui peut alors s'effectuer est celle de l'érosion, l'eau reprend dans son lit mineur les éléments fins en suspension alors que les éléments grossiers sont repris par le charriage.

Mais cette reprise par l'eau doit être effectuée rapidement car plus la lave a été immobilisée et plus il est difficile d'éroder les matériaux la constituant.

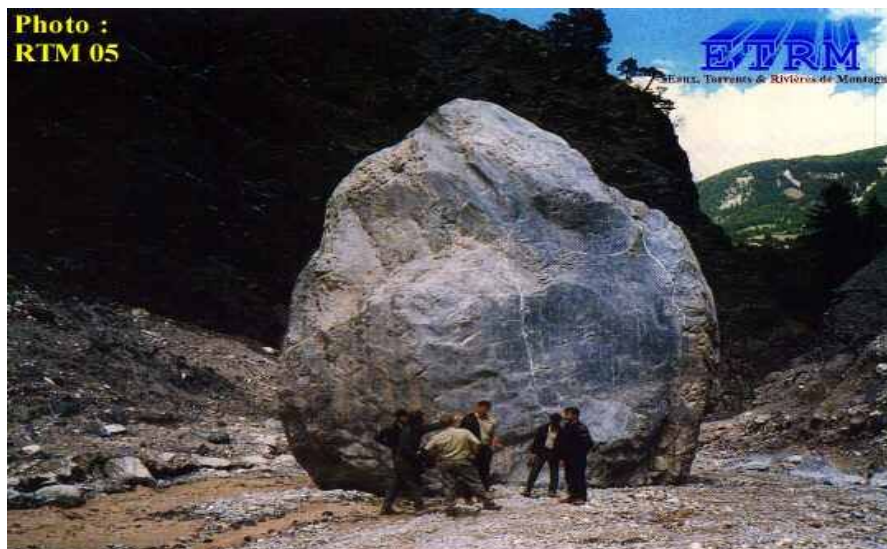


Figure 14 : photographie montrant un bloc transporté par une crue torrentielle, une lave torrentielle pouvant transporter des blocs encore plus gros.

c) caractérisation :

Pour caractériser ces écoulements naturels, les scientifiques ont analysé le mouvement des laves torrentielles avec les méthodes de la mécanique des fluides. Des

chercheurs mettent actuellement au point des modèles de simulation numérique pour comprendre comment se propagent les laves torrentielles.

Des expérimentations sur des maquettes représentant les écoulements réels à plus petite échelle sont également effectuées en laboratoire.

Il est nécessaire de faire plusieurs hypothèses pour caractériser l'écoulement des laves torrentielles.

- Écoulement monophasique : étant donné que le fluide est très visqueux et concentré, la sédimentation est négligeable. Les blocs sont liés au mélange et n'ont pas de mouvement propre.
- Fluide homogène : on néglige l'existence du front, la sédimentation de certains gros blocs, la reprise des matériaux sur les berges.
- Écoulement laminaire : c'est la conséquence de la forte viscosité du fluide.

## **7. Loi de comportement :**

Comme nous l'avons vu précédemment, les laves ne régissent pas comme des fluides newtoniens. Elles peuvent s'immobiliser soudainement au beau milieu d'une pente.

Pour comprendre ce phénomène, des expériences sont réalisées en laboratoire sur des coulées de boue. Un volume de boue versé sur une surface inclinée s'écoule sous l'effet des forces de gravité, puis au bout d'un certain temps s'arrête malgré la pente.

Lorsque l'épaisseur du fluide devient inférieure à une valeur limite dépendant du 'seuil de contrainte', la force de pesanteur est alors insuffisante pour entraîner le tas de boue. Pour remettre le fluide en mouvement il faut alors exercer une pression supérieure à ce seuil. Nous verrons ultérieurement la façon de procéder pour déterminer ce seuil de contrainte.

### **a. Laves torrentielles boueuses :**

Le comportement du mélange est similaire à celui du fluide interstitiel car celui-ci lubrifie le mouvement des grains grossiers. Pour étudier ce comportement en laboratoire, les

scientifiques ajoutent différentes classes granulométriques à un mélange d'eau et de particules fines (argiles et limons).

Des progrès considérables ont été accomplis par Coussot ces dernières années, il a en particulier montré que la loi de comportement des mélanges boueux pouvait être généralement représentée par un modèle de Herschel & Bulkley :

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

Avec :

- $\tau$  : contrainte de cisaillement
- $\tau_c$  : seuil de contrainte dépendant du matériau
- $K$  : coefficient caractéristique du matériau
- $V$  : vitesse de lave à la cote  $y$
- $y$  : distance depuis le fond

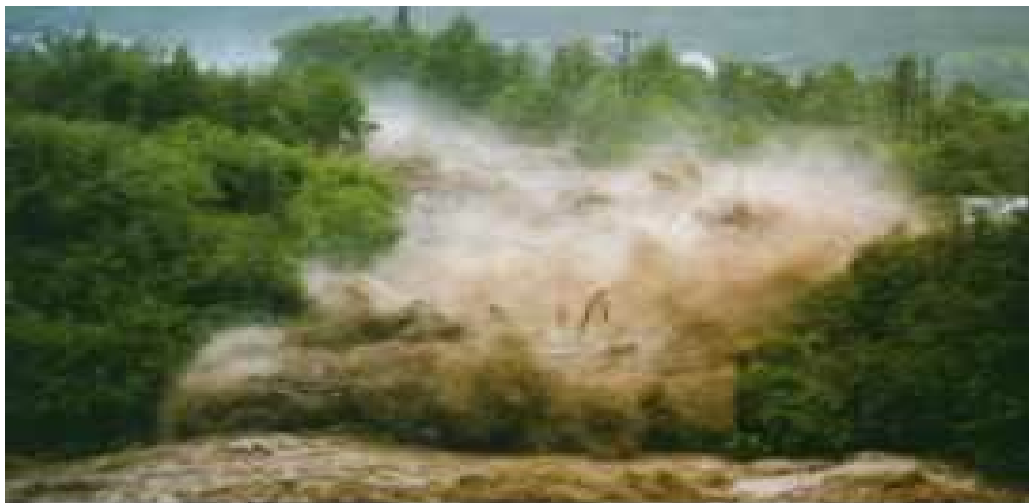


Figure 15 : lave torrentielle au Grisons (1987), (Web9)

Cette photographie d'une lave torrentielle boueuse nous présente un front de déferlement. On comprend alors que la fluidité semble jouer un rôle très important si l'on veut comparer les laves torrentielles aux vagues induites par les inondations.

#### b) Laves torrentielles granulaires :

Ce type de mélange est tel que les contacts entre les grains jouent un rôle prédominant au sein de l'écoulement. Pour étudier cet écoulement, on prend un mélange des grains de toutes tailles sans argile ni eau, les collisions entre grains sont prédominantes. Les écoulements naturels de tels fluides s'avèrent pour l'instant imprévisibles.

Si l'on dispose un milieu granulaire sur un plan incliné dont on augmente progressivement la pente, on observera dans un premier temps des avalanches de surface puis la mise en mouvement de tout le tas le long d'une surface de rupture.

La masse ainsi mise en mouvement avance très rapidement et s'arrête brusquement lorsque la pente devient plus faible.

### 8. Écoulement permanent uniforme d'une lave torrentielle boueuse sur un plan incliné :

On suppose que l'écoulement est laminaire, permanent et uniforme. Le fluide doit être incompressible.

Considérons la lave soumise à un cisaillement simple. Après avoir effectué le bilan des forces sur une portion de lave, on applique le théorème de conservation de la quantité de mouvement ( avec accélération = 0 en régime permanent ), on détermine la résistance au cisaillement :  $\tau = \rho g(h-y)\sin(i)$

➤ Au fond, cette contrainte est maximale, c'est la contrainte à la paroi :

$$\tau_p = \rho g h \sin(i)$$

- Si cette contrainte à la paroi est inférieure au seuil de contrainte, il n'y a pas écoulement du fluide et on obtient la hauteur limite :

$$h_0 = \tau_c / (\rho g \sin(i))$$

- Pour une épaisseur plus faible que  $h_0$ , le fluide reste immobile.
- Par intégration, on obtient le profil des vitesses.
- On peut finalement calculer le débit en intégrant la vitesse sur toute l'épaisseur du fluide.

#### Discussion sur les hypothèses d'étude :

- Influence de la rugosité du lit : on a supposé que cette rugosité était négligeable par rapport à la hauteur du fluide. En effet, dans les creux, le fluide circule à une vitesse plus faible que les couches supérieures. Or le volume de fluide dans ces zones est négligeable vis-à-vis du volume total du fluide en écoulement.
- On a vu que l'écoulement des laves est sous forme de bouffées : le régime est donc transitoire. On ne peut donc pas à priori appliquer les formules établies pour un écoulement permanent. Cependant, à un point donné, après le passage du front, le niveau de la lave diminue lentement au cours du temps ; l'écoulement permanent permet donc d'approcher la réalité.
- Deux paramètres jouent donc un rôle fondamental sur les caractéristiques de l'écoulement (hauteur, vitesse, débit) : le seuil de contrainte et la pente du canal. La hauteur en régime uniforme décroît rapidement lorsque la pente du chenal d'écoulement augmente, elle augmente avec le seuil de contrainte.

## **9. Paramètres rhéologiques des laves torrentielles :**

La variation de ces paramètres est fonction :

- Du type d'argile
- De la distribution granulométrique
- De la concentration solide

La rhéologie se mesure à l'aide de deux appareils qui sont le rhéomètre à plans parallèles et le rhéomètre à cylindres coaxiaux.

On a vu que le fluide ne pouvait plus couler à partir d'une hauteur limite de fluide :

$h_0 = \tau_c / (\rho g \cdot \sin(i))$ . On en déduit que l'épaisseur d'un dépôt de fluide à seuil peut être utilisée pour déterminer la valeur du seuil de contrainte, si l'on est capable de mesurer la masse volumique du fluide et la pente du plan ou du canal.(cf annexes 2)

On peut procéder également en répartissant une couche de fluide sur un canal. On incline le canal très progressivement de façon à vérifier que la vitesse du fluide soit nulle. Tant que le fluide ne s'écoule pas, l'épaisseur  $h$  est inférieure à  $h_0$ . On finit par atteindre la pente limite pour laquelle la valeur de  $h_0$  atteint  $h$  et le fluide commence à s'écouler.

Ainsi, on a déterminé le seuil de contrainte du fluide en augmentant progressivement la contrainte qui lui est appliquée. En pratique, on n'obtient pas une couche uniforme, infiniment longue sur un plan incliné mais plutôt un lobe ou une surface libre incurvée au niveau du front.

On examine donc le cas d'un lobe de lave arrêté sur un plan incliné. Chaque tranche est soumise à un mouvement induit par la composante du poids le long du plan et celui induit par l'étalement du lobe. En appliquant le théorème de conservation de la quantité de mouvement, on peut obtenir l'expression de la forme du lobe.

## IV. Les différentes ondes pouvant donner naissance aux vagues :

### 1. Les équations de Saint-Venant :

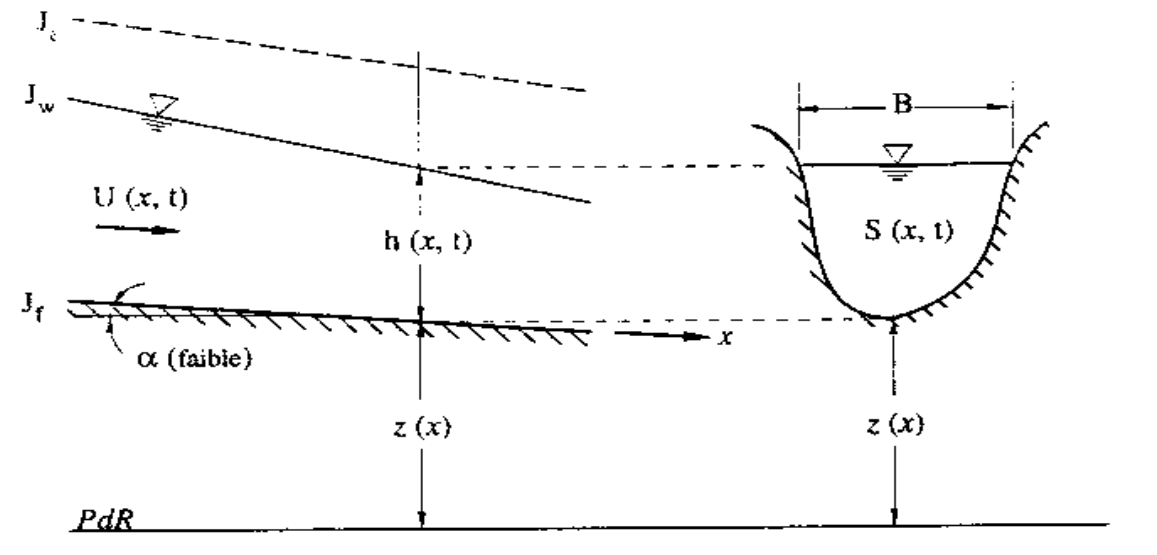


Figure 16 : schématisation des différents éléments intervenant dans les équations.(GRAF)

équation de continuité :  $\partial Q / \partial x + \partial S / \partial t = S \partial U / \partial x + U \partial S / \partial x + B \partial h / \partial t = 0$

équation dynamique :  $\partial U / (g \partial t) + U \partial U / (g \partial x) + \partial h / \partial x + \partial z / \partial x = -J_e$

Ce système d'équations aux dérivées partielles en  $x$  et  $t$ , introduisent deux fonctions inconnues  $h$  et  $U$ . Il faut bien choisir les conditions initiales et limites afin de bien encadrer le problème. L'intégration de ces équations étant souvent très compliquée, on utilise alors des techniques numériques (méthode des caractéristiques, méthode explicite et méthode implicite pour lesquelles on utilise souvent un schéma des différences finies) et graphiques pour les résoudre.

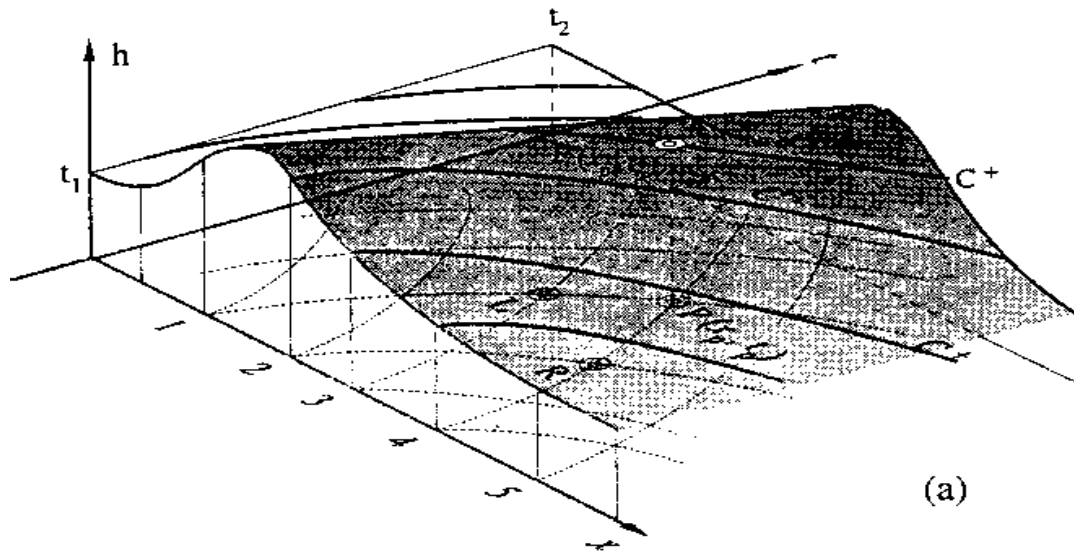


Figure 17 : exemple de modélisation numérique.(GRAF)

Les équations simplifiées de Saint-Venant permettent de décrire différentes ondes selon l'ordre de complexité croissant :

- Onde cinématique
- Onde diffuse
- Onde dynamique quasi permanente
- Onde dynamique

## 2. Onde cinématique :

L'équation de continuité est toujours valable. L'équation dynamique se simplifie étant donné que  $J_f = J_e$ , ce qui s'explique par le fait que les termes de d'inertie et de variation de la profondeur d'eau sont négligeables par rapport au terme dû à la variation du fond  $\partial z / \partial x = -J_f$

En conséquence, la pente du fond et la pente énergétique sont parallèles.

L'équation de l'onde cinématique est la suivante :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + (\frac{\partial Q}{\partial S})_{x_0} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial t} = 0$$



$C_k$  représente la célérité de propagation de l'onde cinématique pour un débit donné, elle est différente pour chaque section d'abscisse donnée

$$x = x_0. C_k = (\partial Q / \partial S)_{x_0} = - (\partial Q / \partial t) / (\partial Q / \partial x).$$

Sans tenir compte de la variation de la profondeur d'eau  $\partial h / \partial x$ , l'onde cinématique ne s'atténue pas, la profondeur maximale reste constante sur son parcours, par contre elle tend à se raidir et augmenter sa courbure. C'est un phénomène que l'on peut rapprocher de celui du mascaret (Cf figure 4 schéma de formation du mascaret 2a).

Dans le cas où le canal est rectangulaire et que la pente du fond est très petite et constante, on peut alors observer une onde géométrique stable appelée onde monoclina.

Rayleigh nous en donne les caractéristiques suivantes :

- La surface d'une onde solitaire négative ne peut pas être en équilibre, de sorte qu'une telle vague s'amortit rapidement.
- Dans un canal donné, il n'existe qu'une seule sorte d'onde solitaire positive de hauteur maximale donnée.
- Cette onde, en fluide parfait, ne subit pas d'amortissement.
- Sa hauteur diminue asymptotiquement et ne s'annule qu'à l'infini. Il n'y a donc pas de véritable longueur d'onde, mais l'hypothèse d'une composante verticale des vitesses est toujours valable et même nécessaire pour mener à bien les calculs.

Russel quand à lui a démontré que cette onde se brisait si son amplitude devenait à peu près égale à la profondeur du lit.

### 3. Onde diffuse :

On considère aussi dans ce cas que les équations de Saint-Venant se simplifient. On estime que les termes d'inertie sont négligeables par rapport aux termes de variation du fond et variation de profondeur d'eau.

En utilisant la relation de Chézy, l'équation dynamique peut alors s'écrire :

$$U = C [R_h.(J_f - \partial h / \partial x)]^{1/2}$$

L'atténuation d'une telle onde est due aux variations de la profondeur d'eau, le coefficient de dissipation  $C_d$  en exprime le taux.

$$C_d = U.h/2[J_f - (\partial h / \partial x)]$$

L'équation d'une onde diffuse est donnée par la formule suivante :

$$\partial Q / \partial t + 3U.\partial Q / \partial x - C_d.\partial^2 h / \partial x^2 = 0$$

Plusieurs approches approximatives ont été établies pour calculer cette atténuation, nous retiendrons celle de Jansen  $\alpha$  al :

$$h = h_0.\exp(-K^2.C_d.t).\sin[K(x - 3Ut/2)]$$

Si la pente du fond est importante, le coefficient de dispersion peut être négligé et l'onde sera approximée par une onde cinématique. En revanche, si la pente est faible, la dispersion est conservée.

#### **4. Onde de crue :**

La forme du mouvement non permanent et leur étude théorique devrait être déduite des équations de Saint-Venant. On distingue deux cas en fonction du nombre de Froude :

- $Fr < 1$ , on est alors en forte pente.
- $Fr > 1$ , la pente est faible.

Dans le cas d'une crue à forte pente, on effectue une approximation par une onde cinématique. On suppose qu'une crue s'élève à un niveau maximal pour ensuite s'abaisser jusqu'à ce que l'écoulement soit revenu à l'état initial. On estime que la forme géométrique est quasi invariable et sans atténuation. En général, ces crues sont de faible importance et se dissipent rapidement.

Dans le cas d'une crue à faible pente, on fait une approximation par une onde diffuse. Sa forme géométrique est variable et il y a alors atténuation.

Par analogie au mascaret on pourrait imaginer qu'une crue constituée d'un train d'ondes puisse créer des vagues lorsque celle-ci rencontre un obstacle conséquent (rupture de pente, embâcles, étranglement de la vallée). La base des ondes serait alors freinée tandis que les crêtes se jetteraient les sur les autres, formant ainsi un front vertical susceptible de déferler.

#### **5. Les ondes de translation :**

On peut constater le déroulement de ce type d'onde pendant :

- l'ouverture et la fermeture d'une vanne, ou d'une écluse.
- de l'exploitation d'une centrale hydroélectrique par la mise en marche ou l'arrêt des turbines.
- L'arrivée d'une crue, un glissement de terrain faisant obstruction.
- Un mascaret.

Ce cas présente plusieurs caractéristiques :

- Écoulement non stationnaire.
- Écoulement rapidement varié.
- Les courbures de lignes de courant ne sont plus négligeables.
- La répartition des pressions n'est pas hydrostatique ; en conséquence, les équations de Saint-Venant ne sont pas applicables.

Il existe 4 sortes d'ondes de translation comme le montre le schéma suivant :

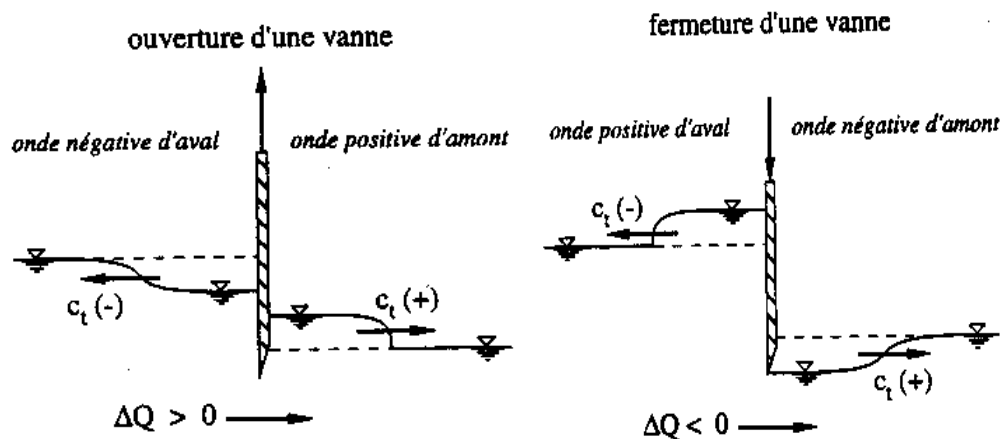


Figure 18 : schématisation des différents types d'ondes de translation.(GRAF)

Ces ondes sont créées par une brusque variation de débit (qu'elle soit positive ou négative, comme le démontre l'appellation de ces différentes ondes). Une discontinuité  $\Delta h$ , forme le front de l'onde. Le corps de l'onde, dont la longueur est souvent négligeable, se développe parallèlement à la surface de l'eau et a pour débit  $Q + \Delta Q$ .

Le front, aussi appelé tête de l'onde peut avoir deux formes que l'onde soit négative ou positive. Les ondes peuvent aussi être considérées comme la somme de plusieurs ondelettes, les ondelettes du haut ayant une célérité  $c = (g.h)^{1/2}$  plus importante que celles du bas :

- Si l'onde est positive, la tête peut être formée d'une seule onde ou d'une suite d'ondelettes raides, déferlantes ou non. Les ondelettes du haut absorbent celles du bas.

- Si l'onde est négative, la tête aura la forme d'une courbe continue, les ondelettes du haut se déplaçant plus vite que les ondelettes du bas. L'onde négative, raide au départ, se déforme plus rapidement que l'onde positive. Il n'y a pas de véritable tête et la notion de hauteur d'onde  $\Delta h$  a moins de sens physique que pour l'onde positive.

On pourrait donc considérer qu'une vague est constituée d'un front semblable à celui d'une onde positive qui déferle, alors que sa queue serait constituée d'une onde négative.

En considérant que l'onde se propage dans une section rectangulaire, la célérité du front est donnée par la formule :

$$C_t = U_1 \pm (gh_1)^{1/2} \cdot [(h_2/2h_1) \cdot (1 + h_2/h_1)]^{1/2}, \text{ avec :}$$

- $U_1$  : vitesse initial de l'écoulement uniforme.
- Le signe – étant utilisé pour décrire les ondes d'aval et le signe + pour les ondes d'amont

Chow nous donne cette même célérité pour un canal trapézoïdal ou parabolique :

$C_t = U_1 \pm (gh_1)^{1/2} \cdot [(S_2 h_{G2} - S_1 h_{G1}) / [S_1(1 - S_1/S_2)]]^{1/2}$ , avec  $h_{Gi}$  cote du centre de gravité de la sections  $S_i$ .

Le cas de la rupture d'un barrage, que l'on imagine fort bien comme pouvant provoquer une vague, est en fait une onde négative d'aval selon Graff. Mais il donne une formule en considérant que :

- L'onde se propage dans un canal à fond horizontal.
- Il n'y a pas de frottement.
- La rupture est considérée comme une ouverture de vanne.

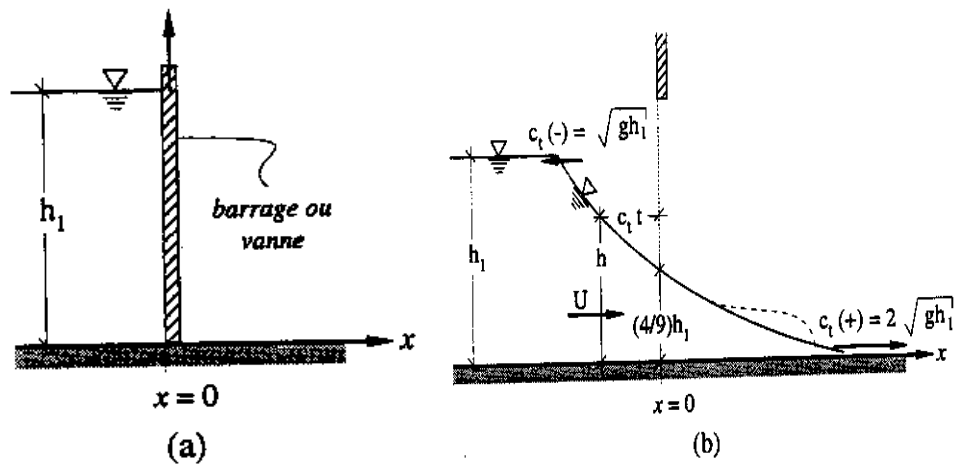


Figure 19 : schématisation de la rupture d'un barrage (GRAF)

Or toutes ces conditions sont défavorables à l'éventuelle formation d'une vague. La modélisation me semble être plus apte à donner des résultats correspondant au déferlement d'une vague plutôt que la méthode analytique.

Néanmoins, la description de la rupture d'un barrage comme étant une onde négative avale pourrait convenir à l'hypothèse qu'une vague puisse se former, sous condition que les forces de frottement mais aussi de la présence d'embâcles ne soient pas négligeables par rapport à la masse d'eau qui déferle. Ces dernières pourraient ralentir le front de progression qui serait alors rattrapé par le reste de la masse d'eau, formant ainsi un front vertical susceptible de former une vague.

## 6. Ondes capillaires :

Les ondes énumérées jusqu'à présent résultaient de l'application directe d'un théorème de mécanique, elles sont dites de 'gravité'.

Les ondes que nous allons voir maintenant sont créées par le vent, à partir d'une infime irrégularité de la surface, une pression différentielle non verticale s'établit entre l'air et l'eau, qu'une force purement liée à la surface équilibre, il s'agit de la tension superficielle. Ces ondes ainsi produites sont appelées ondes capillaires.

Il apparaît alors que la vitesse est inversement proportionnelle à la racine carrée de la longueur d'onde, alors que la formule d'Airy donne au contraire une vitesse directement proportionnelle à cette racine pour les ondes de gravité en eau profonde.

De plus Stokes avait remarqué que chaque onde allait plus vite que le groupe pour un train d'ondes de gravité, alors que c'est l'inverse qui se produit pour les ondes capillaires.

Froude quand à lui constate qu'avec des petites ondes de gravité les ondes capillaires ne sont pas négligeables. En fait ces deux types d'ondes interviennent ensemble dans un rapport plus ou moins grand.

C'est en fait une combinaison des deux sortes de ondes que Thomson avait étudié. On peut réaliser le phénomène au moyen d'un petit obstacle immobile près de la surface d'un courant de vitesse  $V$ . Un système d'ondes stationnaires apparaît alors. A l'amont, elles sont plus courtes qu'à l'aval et s'amortissent rapidement (Cf figure 20)



Figure 20 : schématisation de l'amortissement des ondes (NORDON)

Or si l'on refait les calculs en tenant compte des deux types de formation, on obtient une célérité résultante (Cf figure 21). On y voit que les ondes de gravité n'ont quasiment plus d'importance pour une longueur d'onde inférieure à une certaine valeur A, et pour l'onde capillaire au contraire supérieur à une valeur B.

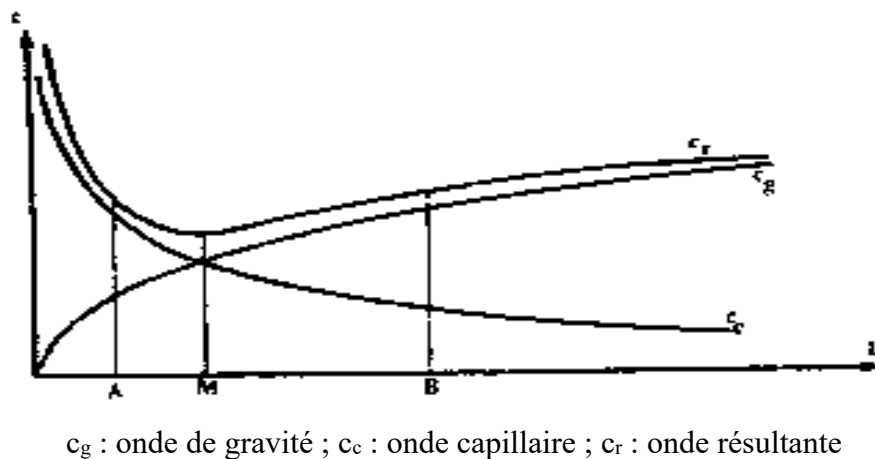


Figure 21 : graphique représentant l'importance relative des vitesses d'ondes.(NORDON)

Pour produire uniquement des ondes capillaires, il faut que le vent soit suffisamment faible (de l'ordre de 2 à 3 km/h). Si le vent tend à devenir plus fort, la régularité des rides disparaît et le mouvement se transforme en ondes de gravité.



## **Conclusion :**

L'existence de ces vagues n'est pas encore scientifiquement prouvé, néanmoins ce rapport apporte des éléments dont le but est d'aller dans le sens de leur existence. Il s'avère pourtant qu'outre atlantique, le phénomène paraît bien réel (comme le démontre cet article paru sur le site web du ministère environnementale américain, cf site web10). Cet article datant de 1996 insiste tout de même sur le fait que ce phénomène doit être étudié plus en détail.

Effectivement, les conséquences de telles vagues auraient forcément une incidence sur les dégâts causés par les inondations. C'est en fait la variation de pression au niveau de la crête qui y joue un rôle majeur, plus cette variation est rapide et plus les dégâts sont importants. Par analogie, une vague maritime peut dans ces conditions exercer une pression de  $700 \text{ t/m}^2$ .

On peut noter qu'en 1820 Bidone assimile le remous à une vague de vitesse nulle, une autre façon d'aborder le problème est de le considérer comme une accumulation d'ondes insuffisamment rapides pour remonter le courant.

Les laves torrentielles paraissent être un bon point de départ pour étudier ce phénomène lorsque l'on observe la figure 15. Le mascaret en est un autre si l'on essaie de faire l'analogie entre sa formation et le déplacement des ondes en surface libre.

## **BIBLIOGRAPHIE :**

### Livres :

NORDON.M, Histoire de l'hydraulique, Masson, tome 2.

GRAF.Wh, hydraulique fluviale, écoulement non permanent et phénomènes de transport, presses polytechniques et universitaires de romande, Lausanne, tome 2, 1993.

BOUTELOUP.J, vagues, marées, courants, presses universitaires de France.

ROUCH.J, les marées, Paris, Payot.

SHOM, guide du navigateur, méthodes et instruments de navigation, tome 2.

### Sites web :

Web1 : [www.brgm.fr/risques/antilles/mart/i.lave.htm](http://www.brgm.fr/risques/antilles/mart/i.lave.htm)

Web2 : [www.crealp.ch/fr/contenu/crealp\\_coulée\\_tasch2.asp](http://www.crealp.ch/fr/contenu/crealp_coulée_tasch2.asp)

Web3 : [www.unil.ch/igul/INFOETUD/ENSEIGNEMENT/enseigeophys/carte\\_morpho/for\\_fluvial\\_03/011\\_rav\\_17.htm](http://www.unil.ch/igul/INFOETUD/ENSEIGNEMENT/enseigeophys/carte_morpho/for_fluvial_03/011_rav_17.htm)

Web4 : [etrm.chez.tiscali.fr/hydrator.htm](http://etrm.chez.tiscali.fr/hydrator.htm)

Web5 : [etrm.chez.tiscali.fr/boscodon/boscodon.htm](http://etrm.chez.tiscali.fr/boscodon/boscodon.htm)

Web6 : [www.univ-savoie.fr/mse/ressources/rapports/rapports00/Borgey/sommaire.htm](http://www.univ-savoie.fr/mse/ressources/rapports/rapports00/Borgey/sommaire.htm)

Web7 : [www.lgge.obs:ujf-grenoble.fr/~annel/Documentaire/RisquesGlaciaires/RisquesHome.html](http://www.lgge.obs:ujf-grenoble.fr/~annel/Documentaire/RisquesGlaciaires/RisquesHome.html)

Web8 : [www.unifr.ch/geoscience/geographie/glaciers/les%20Marges.htm](http://www.unifr.ch/geoscience/geographie/glaciers/les%20Marges.htm)

Web9 : [www.geol.unine.ch/cours/geol/massflow.htm](http://www.geol.unine.ch/cours/geol/massflow.htm)

Web10 : [az.water.usgs.gov/roughness/twave.html](http://az.water.usgs.gov/roughness/twave.html)

Web11 : <http://sfa.univ-poitiers.fr/commedia/MSTgeotech2000/mascarets/bibliographie.html>

Web12 : [www.univ-Lyon3.fr/umr5600/actu/anglaisfran.htm](http://www.univ-Lyon3.fr/umr5600/actu/anglaisfran.htm)

Web13 : [www.univ-lehavre.fr/cybernat/pages/mascaret.htm](http://www.univ-lehavre.fr/cybernat/pages/mascaret.htm)

Web14 : [mascaret.gironde.waika9.com/WINDOWS/Personnal/mascaret.html](http://mascaret.gironde.waika9.com/WINDOWS/Personnal/mascaret.html)

Web15 : [ac-versailles.fr/etabliss/bdeniau/actanvie/mascaret.htm](http://ac-versailles.fr/etabliss/bdeniau/actanvie/mascaret.htm)

Web16 : [pvergnaud.free.fr/php/home.php?ID=44](http://pvergnaud.free.fr/php/home.php?ID=44)

Web17 : [www.ac-rouen.fr/lycees/prevert/les%20vagues/page20.htm](http://www.ac-rouen.fr/lycees/prevert/les%20vagues/page20.htm)

# **TABLE DES MATIERES :**

Sommaire :	p.1
Introduction :	p.2
I. Le déferlement des vagues marines :	P.3
1) Les facteurs de formation :	p.3
2) Les différents types de déferlement :	p.3
3) Les trains d'ondes :	p.4
➤ Figure 1	p.4
II. Le mascaret :	p.5
1) Les marées alluviales :	p.5
➤ Figure 2	p.5
2) Les mécanismes :	p.6
➤ Figure 3	p.7
➤ Figure 4	p.8
3) Les conditions de formation :	p.9
4) Caractérisations :	p.9
➤ Figure 5	p.10
➤ Figure 6	p.11
➤ Figure 7	p.12
III. Les laves torrentielles :	p.13
1) Qu'est-ce qu'une lave torrentielle ?	p.13
➤ Figure 8	p.14
2) Les caractéristiques physiques :	p.15
➤ Tableau 1	p.15
3) Les différents types :	p.16
a. Les laves torrentielles boueuses	p.16
➤ Figure 9	p.16
b. Les laves torrentielles granulaires	p.17
➤ Figure 10	p.17
➤ Tableau 2	p.18
4) La formation :	p.18
a. Les facteurs de décohésion du substrat	p.18
➤ Figure 11	p.19
b. Formation par accumulation de matière	p.19
➤ Figure 12	p.20
5) Les différents modes de déclenchements :	p.20
a. Laves provoquées par un glissement de terrain	p.20
b. Laves à génèse hydrologique	p.21
c. Laves provenant de débâcle glacier	p.21
➤ Figure 13	p.21

6) Quantification et qualification des écoulements :	p.22
a. Ecoulement	p.22
b. reprise du mouvement	p.23
➤ Figure 14	p.23
c. Caractérisation	p.24
7) Loi de comportement :	p.24
a. Laves torrentielles boueuses	p.25
➤ Figure 15	p.25
b. Laves torrentielles granulaires	p.26
8) Ecoulement permanent uniforme d'une lave torrentielle boueuse sur un plan incliné :	p.26
9) Paramètres rhéologiques :	p.28

#### IV. Les différentes ondes pouvant donner naissance aux vagues :

1) Les équations de Saint-Venant :	p.29
➤ Figure 16	p.29
➤ Figure 17	p.30
2) Onde cinématique :	p.30
3) Onde diffuse :	p.32
4) Onde de crue :	p.33
5) Ondes de translation :	p.33
➤ Figure 18	p.34
➤ Figure 19	p.36
6) Ondes capillaires :	p.37
➤ Figure 20	p.37
➤ Figure 21	p.38

Conclusion : p.39

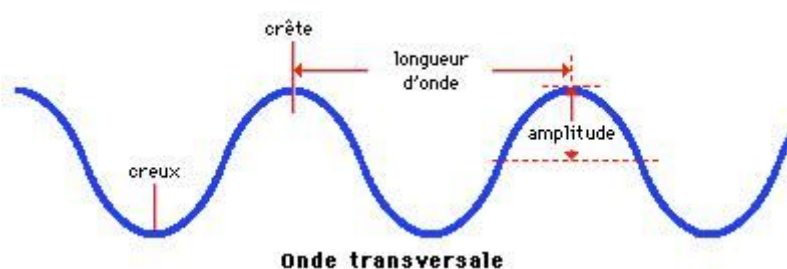
Bibliographie : p.40

## Annexes 1 : définitions.

Vague : déplacement à la surface des océans d'ondes périodiques générées par le vent. Les vagues marines ont une grande variété de formes, de dimensions et de vitesses de propagation. Leur comportement peut être modélisé à partir des formes ondulatoires, beaucoup plus simples, utilisées par les mathématiciens, et analysé en terme de période, vitesse et écartement (longueur d'onde).

Pour les grandes vagues océaniques, la vitesse de propagation est proportionnelle à la période : plus les vagues sont espacées, plus elles voyagent vite. Une autre équation établit que la longueur d'onde est proportionnelle au carré de la période.

Onde : mouvement de la surface de l'eau, d'un liquide qui forme des rides concentriques qui se soulèvent et s'abaissent à la suite d'un choc.



Soliton : une onde solitaire est une onde qui se propage en ignorant les lois classiques de la dispersion de l'énergie. En règle générale, cette onde est suffisamment intense pour exciter un effet non linéaire qui va compenser l'effet normal de dispersion de l'énergie.

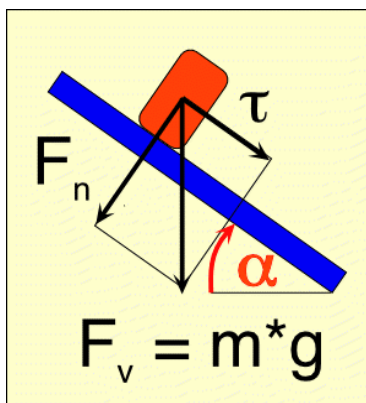
L'énergie, par le phénomène non linéaire, crée un puit de potentiel dans son milieu de propagation. Ce puit piège l'énergie et l'empêche de se disperser. Bien après l'observation en 1850 par Scott-Russel de ce phénomène spectaculaire par une vague dans un canal, on se rend compte que ces paquets d'énergie pouvaient subir des forces qui leur donnent des propriétés matérielles. D'où le nom de solitons. Les solitons existent dans la nature. On peut citer par exemple les phénomènes de mascaret observé sur la Seine jusqu'à Rouen, ou sur la Tamise...les raz de marées...Bien souvent, dans la physique, la présence de solitons provoque des phénomènes non réversibles, destructions, ruptures...

Lave torrentielle : Par lave torrentielle on désigne un phénomène intermédiaire entre le charriage et le glissement de terrain. La difficulté de sa définition est renforcée par la variation des propriétés des laves torrentielles non seulement d'un torrent à l'autre mais aussi d'une lave à l'autre en fonction des matériaux qui lui sont fournis. Ainsi, plusieurs critères sont utilisés - suivant les auteurs - pour les définir.

Dans certains cas, le mélange est dépourvu d'éléments fins. Le comportement particulier des laves boueuses (en particulier lié à la présence d'argile) ne peut alors plus être observé.

Dans ce cas, l'écoulement est beaucoup plus complexe, très instable et la frontière avec le charriage hyperconcentré est particulièrement ténue.

## Annexes 2 : expériences en mécanique des sols .



Cette expérience, qui permet dans le cadre de ce rapport de mettre en place les différentes forces en jeu pour une mise en mouvement, démontre aussi l'action de pression de pore.

- force de cisaillement  $\tau = F_v \cdot \sin \alpha$
- force normale (pressant la canette sur la planche),  $F_n = F_v \cdot \cos \alpha = m \cdot g \cdot \cos \alpha$
- friction =  $F_v \cdot \mu \cdot \cos \alpha$

avec  $\mu$  : coefficient de friction, qui varie très peu en fonction de l'état ( sec ou mouillé ) de la surface, et dont la valeur oscille entre 0.4 et 0.7 pour les matériaux rocheux.

La canette est stable si la force de cisaillement  $\tau < \text{friction}$ .

Avec l'augmentation de la pente,  $\tau$  augmente alors que la friction diminue ; ce qui fait qu'à partir d'un certain angle, dépendant de  $\mu$ , la canette commence à glisser.

En pratique, la canette se met en mouvement pour une pente approchant 30°, que la surface soit sèche ou mouillée. Par contre une canette sortant du frigo glisse pour une pente qui est inférieure à 5° :

- l'air froid à l'intérieur de la canette se réchauffe et se dilate.
- La pression interne devient supérieure à la pression atmosphérique.
- La canette est 'soulevée' et commence à glisser.

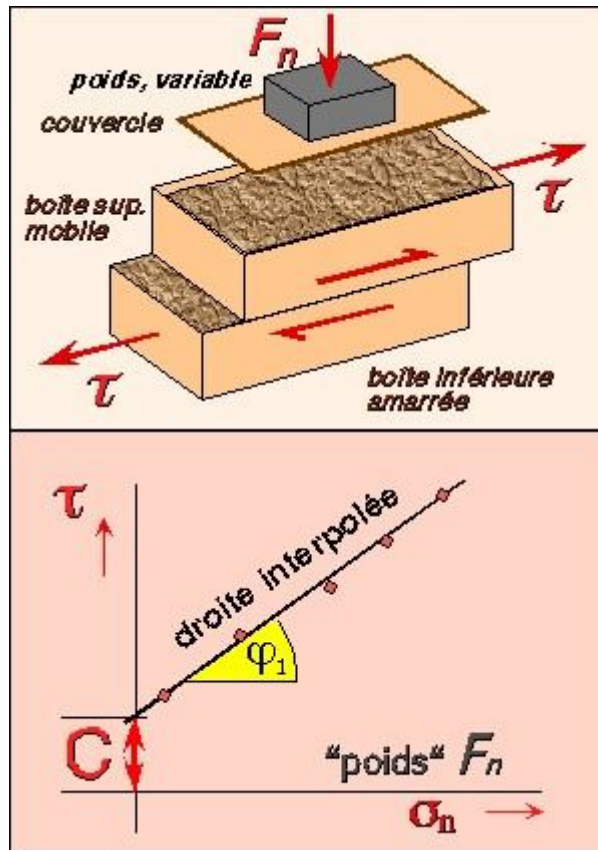
On en tire alors la formule suivante :

$$\text{friction effective} = ( F_v - \text{pression de pore} ) \cdot \mu \cdot \cos \alpha$$

Plusieurs facteurs peuvent intervenir dans la modification de la pression de pore, telles que des pluies prolongées, une montée de la nappe phréatique, la construction d'un lac de barrage, etc...



### La boîte de Casagrande :



Cette méthode permet de déterminer la résistance d'un matériau meuble possédant une cohésion.

- On remplit la boîte avec le matériau à tester.
- On pose un poids connu sur le couvercle.
- On tire sur le côté.
- On répète l'expérience avec des poids de plus en plus grands, ce qui nécessite des forces cisailantes de plus en plus élevées.

Les résultats sont reportés sur un graphique :

- Sur l'axe des abscisses, on reporte le poids normalisé par rapport à la surface du couvercle, ce qui correspond à la contrainte normale  $\sigma_n$ . En réalité 3-D, il existe trois contraintes normales, de valeurs différentes et

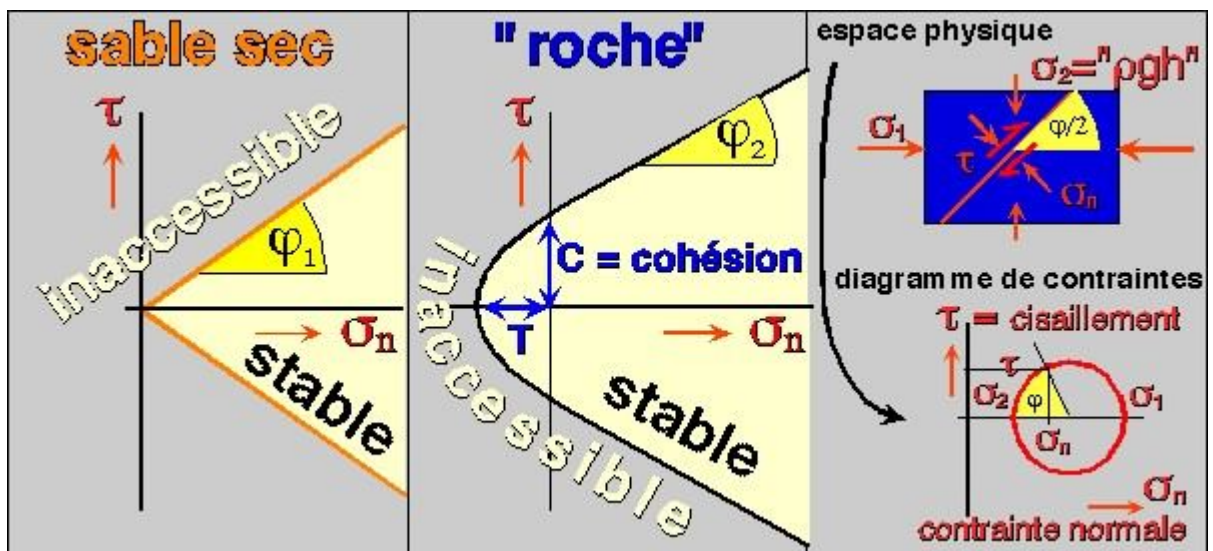
mutuellement perpendiculaires ; que l'on désigne sous le nom de tenseur de contrainte.

- La contrainte verticale correspond au poids des matériaux.
  - Les deux autres contraintes horizontales sont dépendantes de la profondeur, du matériau et d'autres facteurs.
  - Dans un matériau liquide, isotrope, il n'y a pas de différence entre contrainte verticale et horizontale.
  - On parle de pression lithostatique, par analogie à la pression hydrostatique dans l'eau.
- sur l'axe des ordonnées, on reporte la force horizontale normalisée par rapport à la surface du couvercle, ce qui correspond à la contrainte cisailante

On en tire deux paramètres :

- $\psi$  : la pente aussi appelée angle de friction interne
- $c$  : la cohésion, lue sur l'intersection entre la droite obtenue et l'axe des ordonnées.

diagramme de Mohr – Coulomb :



Ce diagramme présente la résistance des matériaux.

(Source : [www-geol.unine.ch/cours/geol/mass\\_flow.html](http://www-geol.unine.ch/cours/geol/mass_flow.html))

