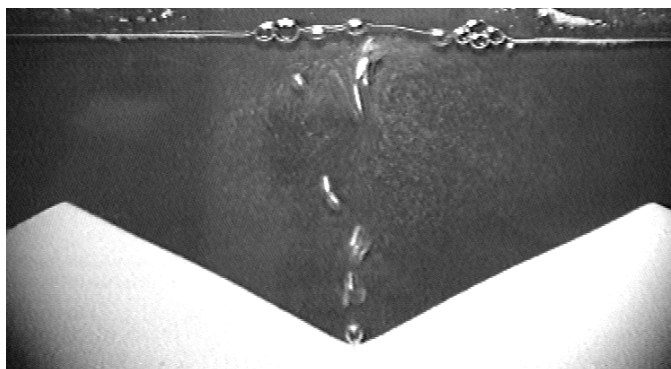


Etude de la dynamique de formation d'un cratère  
lors de l'émission d'un gaz  
au travers d'une couche de matériau granulaire immergé

VEROT Jean-Baptiste



Résumé :

J'ai réalisé une étude expérimentale du problème en observant l'influence de paramètres tels que le débit de l'émission, la hauteur d'eau et la hauteur de sable. Cette étude a été réalisée à l'aide d'acquisitions vidéos et de traitement des images par des procédés manuels ou automatisés. Au terme de mon stage, j'ai mis au point des protocoles expérimentaux reproductibles mais dont les résultats sont difficiles à exploiter. En effet, la multitude d'événements contribuant à la formation du cratère fait qu'il est difficile de les découpler et donc de connaître la véritable influence d'un paramètre.

Mot-clés :

Matériau granulaire, écoulements turbulents, suspension de bille, angles de glissement

Laboratoire de Physique de l'ENS-Lyon  
46, allée d'Italie  
69364 LYON CEDEX 7

Jean-Christophe Géminard et Hervé Gayvallet

03/09/2002

## TABLE DES MATIERES

### INTRODUCTION

### PRINCIPE GENERAL

### DISPOSITIF EXPERIMENTAL

### PHENOMENES ET MOUVEMENTS DANS LA COUCHE DE GRAINS

Création du canal : digitations  
Différents régimes observés  
Mouvements dans la couche et zones de déplacements

### MOUVEMENTS DANS L'EAU ET TRANSPORT DES BILLES

Différents écoulements observés  
Influence de la montée des bulles  
Transport des billes  
Etude des angles de glissement

### ETUDE GLOBALE DE L'EVOLUTION DU CRATERE

Influence de la hauteur d'eau  
Influence du débit  
Influence de la hauteur de sable  
Linéarité de l'abscisse en fonction de l'ordonnée

### CONCLUSION

### ANNEXE : MACRO DE TRAITEMENT D'IMAGES

## **INTRODUCTION :**

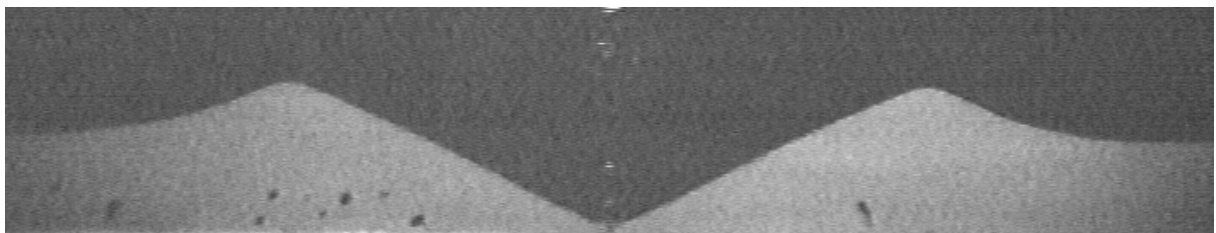
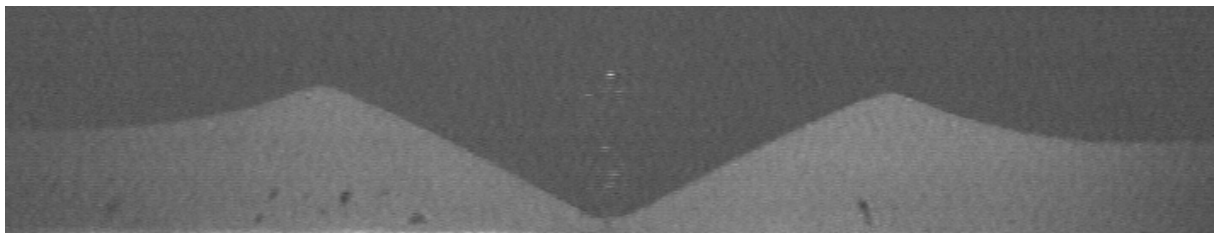
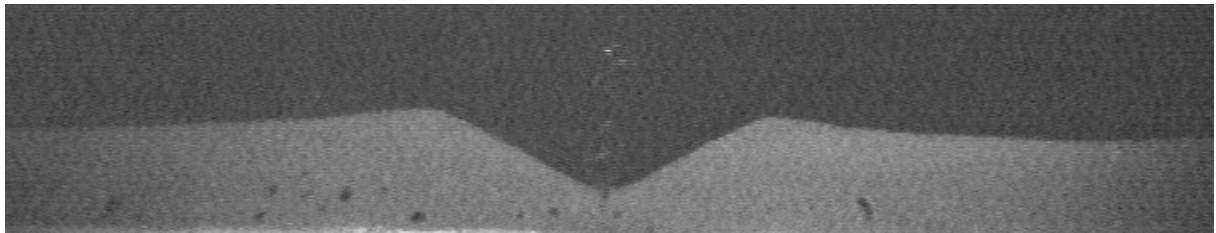
J'ai effectué mon stage avec Jean-Christophe Géminard, au Laboratoire de physique de l'ENS. Le sujet était l'étude de la dynamique de formation d'un cratère, par émission d'air au travers d'une couche de bille, immergée, en deux dimensions.

Ce problème, bien que semblant simple, est en fait très complexe car il fait appelle à de très nombreux phénomènes. Ainsi si c'est un problème de comportement des milieux granulaires, son étude révèle l'influence de comportements visqueux (dû au confinement), de phénomènes capillaires (cohésion du lit de billes et passage de l'air à travers les grains), des phénomènes hydrodynamiques (turbulences dues à la montée des bulles et rouleaux de convection créés par l'interface).

Mon étude restera très qualitative car il est difficile de mettre en évidence des lois précises d'évolution, j'ai donc essayé de montrer les différentes phases de formation des cratères ainsi que les paramètres influents dans ce problème.

Pour étudier le problème, l'expérimentation a été basée sur des acquisitions vidéo suivies de traitements des images (pointage manuel et tracés automatisés).

### **Images montrant l'évolution du cratère**



## **PRINCIPE GENERAL :**

Le principe de cette expérience consiste à injecter de l'air dans une cuve en verre de 2mm d'épaisseur ; cette cuve contient une couche de billes de verres (qui modélise le sable) immergée dans l'eau.

Pour apporter l'air dans la cuve, on utilise la vanne d'air comprimé à laquelle on ajoute un détendeur et un tube capillaire (pour imposer un débit massique) puis ce flux d'air est amené dans une chambre de 50cl qui joue le rôle d'un condensateur (la pression augmente lentement dans la chambre avant que l'air ne s'en échappe ). Après être passé dans ce dispositif, l'air est injecté dans la cuve.

Ces variations de pression sont nécessaires si l'on impose le débit car la condition de passage de l'air à travers la couche est donnée par une pression de seuil qui tient compte de la pression hydrostatique et de la surpression capillaire.

La première montée de l'air dans la couche fait apparaître des phénomènes de digitation : l'air essaie de se frayer un passage en formant des canaux entre les grains et en essayant différents chemins.

Lorsque l'air atteint l'interface sable/eau, on observe la formation de bulles, dont la taille dépend de la profondeur de cette interface et du diamètre du canal formé.

Les bulles montent ensuite à la surface en créant des turbulences et un certain nombre de billes est entraîné dans leur sillage.

La succession des émissions et des montées de bulles crée aussi des convections dans l'eau. En montant, les bulles entraînent une colonne d'eau qui se sépare en deux à l'arrivée sur l'interface eau/air : créant ainsi des rouleaux de convections entretenus par l'émission.

Les billes soulevées par les bulles sont donc ensuite transportées dans les rouleaux et expulsées sur les bords du canal. Suivant la taille des billes, leur mouvement est plus ou moins similaire à celui du fluide (compétition entre la force visqueuse et le poids de la bille).

En se déposant sur le lit de sable, les billes forment deux monticules 'symétriques' par rapport à l'axe du canal. Au départ, les billes sont simplement déposées jusqu'à atteindre les angles limites de glissements et elles forment ainsi des tas triangulaires de chaque côté du canal.

Les billes mises en mouvement par la suite vont donc avoir deux possibilités :

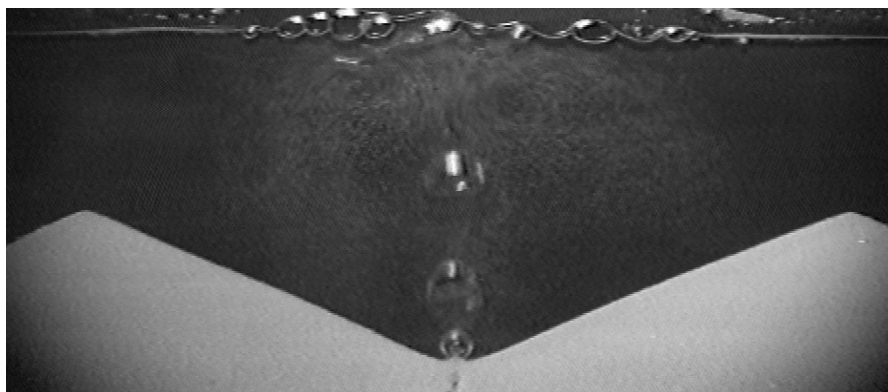
soit elles sont projetées dans la pente intérieure du cratère et elles glissent donc vers le canal pour être de nouveau soulevées

soit elles atteignent le flan extérieur du cratère et elles glissent vers le bas de la pente et contribuent au déplacement du sommet du talus

Le mouvement du sommet (coordonnées  $x, y$ ) suit un comportement 'logarithmique' (mais limité par les conditions imposées par la cuve) ce qui rend difficile l'estimation de la portée des jets.

La coexistence dans ce même problème de tous ces phénomènes conduit à la formation de cratères dont l'envergure et la profondeur dépendent de nombreux facteurs que j'essaierai de distinguer.

### **Image montrant la coexistence des phénomènes**

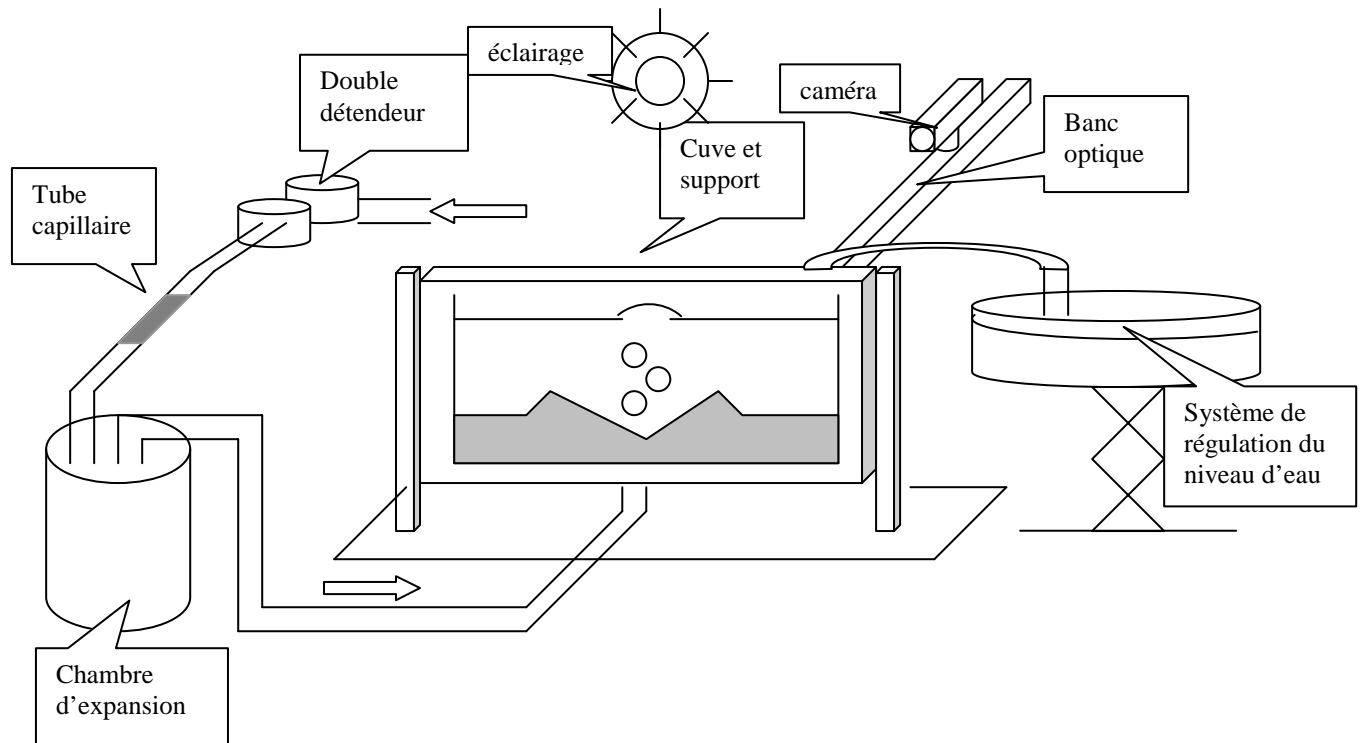


### **DISPOSITIF EXPERIMENTAL :**

Pour étudier la formation des cratères, les objectifs étaient de chercher l'influence de différents paramètres :  
débit à l'entrée de la chambre  
hauteur de sable  
hauteur d'eau

Le dispositif expérimental est donc prévu pour permettre de faire varier ces paramètres.

### Schéma du dispositif expérimental



### Dispositif de contrôle du débit :

Le débitmètre-vanne généralement utilisé pour imposer un débit massique est ici remplacé par un détendeur, qui impose une pression à sa sortie, auquel on associe un tube capillaire (longueur=cm, diamètre .2mm) qui introduit une perte de charge grande devant celle introduite par le canal. Ainsi le débit d'air amené par le détendeur ne varie pas en fonction des variations de pression dans la chambre.

Ce montage permet donc de remplacer le débitmètre-vanne (utilisé dans l'article de référence 'dynamics of a gas bubble rising through a thin immersed layer of granular material : an experimental study') avec suffisamment de précision et va donc permettre d'imposer un débit constant vers la chambre.

### Chambre d'expansion :

Pour poursuivre les travaux effectués sur le passage d'un gaz à travers un lit de billes immergées ('dynamics of a gas bubble rising through a thin immersed layer of granular material : an experimental study' de L.Gostiaux, H.Gayvallet et J-C.Géminard dans Granular Matter ) il fallait opérer avec une chambre ayant un volume suffisant pour permettre des variations de pression en amont du trou d'émission.

Pour cela j'ai placé une bouteille sur le circuit d'arrivée de l'air. Elle est placée dans un bac d'eau pour réduire l'influence des variations de température sur le débit volumique.

Cuve :

La cuve d'origine est faite de deux plaques de verre espacées de 2mm pour modéliser le comportement en deux dimensions. Elle mesure 28cm de largeur et 18cm de hauteur ce qui pose des problèmes d'effet de bord (limitation par le fond ou par les bords).

Pour supprimer ces effets de bord, j'ai construit une cuve de plus grande taille (L=68cm ; H=39cm) ; mais à cause de problèmes de fuites, le nombre d'expériences réalisées avec cette cuve est restreint mais montre quand même l'influence des bords de la première cuve. Un autre problème survenu avec la grande cuve est la rigidité des parois : les parois se courbent sous le poids de l'eau. Ceci nous empêche donc de travailler avec de grandes hauteurs d'eau.

Les cuves doivent être positionnées en réglant bien l'horizontalité et la verticalité du plan pour éviter la différenciation des cotés (perte de la symétrie du système). En effet, si la cuve n'est pas fixée verticalement, les billes vont tomber en longeant une des parois et vont donc être anormalement freinées ; de plus si la cuve n'est pas horizontale, la portée des jets n'est plus la même de par et d'autre du canal et le problème n'est donc plus symétrique.

Siphon :

J'ai muni la cuve d'un système basique de vases communicants pour permettre de stabiliser la hauteur d'eau en compensant l'évaporation.

La cuve est reliée par un tuyau à un récipient ayant une grande section devant celle de la cuve, ainsi le niveau d'eau dans ce réservoir reste quasiment fixe et impose celui de la cuve.

Ce dispositif s'est avéré nécessaire pour les acquisitions sur des temps longs (une nuit ou un week-end).

Tuyau de brassage :

Les matériaux granulaires sont sensibles au vieillissement et au tassement, il est donc nécessaire de brasser le sable peu de temps avant l'expérience pour pouvoir obtenir une expérience reproductible. Pour brasser les billes j'ai utilisé un tube fin en laiton débitant de l'air (pour remuer sans se boucher). Grâce à ce procédé, les billes forment un lit homogène qui permet de rendre l'expérience reproductible et donc significative.

Eclairage :

Pour pouvoir filmer les billes en suspension, on éclaire par réflexion ; ainsi en plaçant la lumière du côté de la caméra les billes apparaissent comme des points clairs.

De plus, pour augmenter le contraste au niveau de l'interface grain/eau, on place un écran noir derrière la cuve.

Cet éclairage permet de traiter les acquisitions vidéo à l'ordinateur en repérant les changements d'intensité.

Matériel d'acquisition :

Pour suivre l'évolution des cratères, j'ai utilisé une caméra reliée à un magnétoscope et à un ordinateur. J'ai utilisé différentes techniques pour repérer les mouvements des talus :

Le pointage manuel des sommets et du fond du cratère est utilisé pour des films d'environ soixante images (films réalisés sur 'Scion'). Cette méthode est assez précise mais longue et rébarbative. Elle permet de tracer les courbes d'évolution des positions des sommets en fonction du temps. Le tracé automatisé, lui, permet d'obtenir des graphiques où sont superposés les profils du cratère à différents instants de sa formation. L'automatisation est faite sur 'Igor Pro' à l'aide de macros et permet de passer d'une séquence d'images à des graphiques d'évolution du profil, des angles et des pentes. Cette méthode est rapide et montre bien l'évolution des cratères mais elle pose tout de même des problèmes pour la mise à l'échelle des dimensions. Le détail des macros est donné en annexe.

## **PHENOMENES ET MOUVEMENTS DANS LA COUCHE DE GRAINS:**

Création du canal : digitations

Aux temps initiaux, lorsque l'air commence à passer dans la couche de billes, il se fraye un chemin parmi la multitude de 'capillaires' (formés par les interstices entre les grains) en formant des

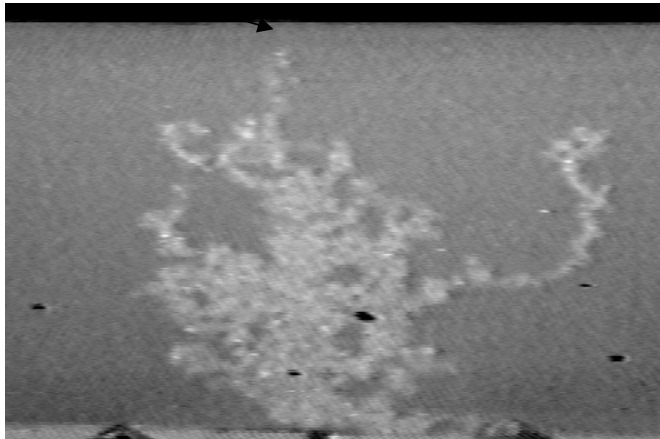
digitations. Une fois que l'air a atteint l'interface bille/eau, la poche d'air se vide par le canal creusé et la formation du cratère peut commencer.

Le temps mis par l'air pour traverser la couche et l'endroit de sortie du canal sont très variables sur une même expérience car seules les forces de pesanteur guident l'air vers la sortie et le reste des contraintes, venant de la répartition des grains, ne sont pas reproductibles.

Mais ces différences ne sont pas importantes pour la suite de l'expérience car si le canal initialement formé n'est pas vertical, le système va se symétriser par la suite en recentrant le canal : le comportement asymptotique n'en est donc pas modifié. Même dans les cas où le passage de l'air forme plusieurs orifices de sortie, le système arrive à privilégier le trou central aux autres initialement présents.

### **Image d'une digitation lors de la montée de l'air dans la couche :**

Interface sable/eau



trou d'injection

Différents régimes observés :

Il existe différents régimes de passage de l'air à travers la couche. Il y a compétition entre deux situations bien distinctes :

Soit l'air forme un canal rigide entre les grains et dans ce cas l'écoulement est similaire à celui dans un poreux : frottements sur les parois et autres pertes dues aux irrégularités du canal ; les mouvements des grains sont inexistantes autour du canal et l'air est conduit directement du bas de la couche jusqu'à l'eau où il sort sous forme de bulles régulières dont l'émission est périodique

Soit l'air met les billes en suspension (augmente l'intervalle entre les grains), dans ce cas on observe la formation de bulles d'air dans la zone fluidifiée. Un phénomène répétitif (régulier mais pas périodique) apparaît : une poche se forme à partir du trou d'injection et monte en créant des mouvements de convection dans la couche (les billes glissent le long de la poche d'air en expansion pour la fermer et en faire une bulle, qui va ensuite monter). Les bulles ainsi formées vont se vider à l'interface bille/eau sous forme de trains de bulles.

Ces deux régimes ont des comportements très différents car l'un émet des bulles continûment : on l'appellera par la suite régime continu alors que l'autre émet des trains de bulles : on l'appellera régime fluide (en raison de l'origine de ces trains de bulles).

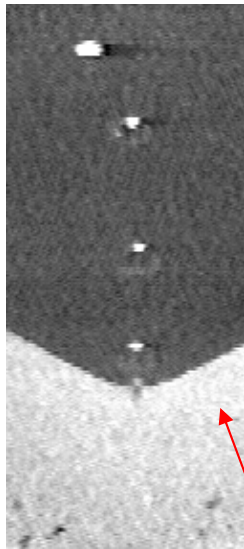
Ainsi, il apparaît évident que suivant le régime, les mouvements de l'eau, et donc les modes de transport des grains, vont être différents. Ces changements seront traités dans la suite du rapport (§ régimes de bulles).

### **Visualisation des deux régimes :**

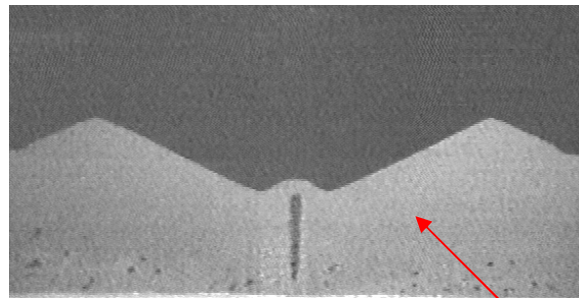
Régime continu :

Régime fluide :





émission continue de bulles



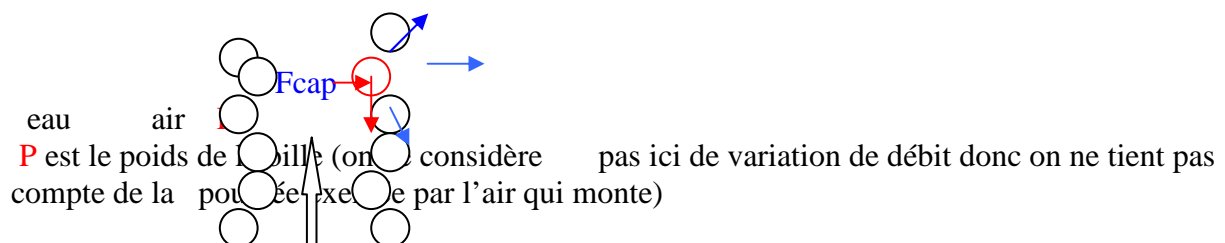
poche d'air au sein de la zone fluidifiée

Il faut noter que si les conséquences de changements de régimes sont grandes, le passage de l'un à l'autre est assez fréquent mais difficile à justifier. En fait, il semblerait que de petits événements peuvent déstabiliser un de ces modes d'émission et conduire à un nouvel état stable : tassements ou chutes des grains.

Pour pouvoir interpréter les observations, il faut donc noter précisément si des changements de régimes ont lieu durant les expériences.

Les changements de régime et donc la stabilité du canal sont reliés à la présence d'événements perturbateurs mais aussi à des paramètres du système : débit de l'injection et la taille des billes. Pour de forts débits on observe un canal stable ne subissant que rarement des changements de régime. De même plus les billes sont petites, plus le canal est stabilisé car il doit sa rigidité aux forces capillaires qui retiennent les grains sur les parois du canal :

### Schéma de la paroi du canal rigide :



$P$  croît en  $R^3$  et  $F_{cap}$  est en  $1/R$  ( $R$  rayon de la bille peut être considéré comme la longueur caractéristique capillaire) donc on voit que si le canal est plus facile à creuser avec de grosses billes, sa stabilité elle diminue avec la taille de la bille.

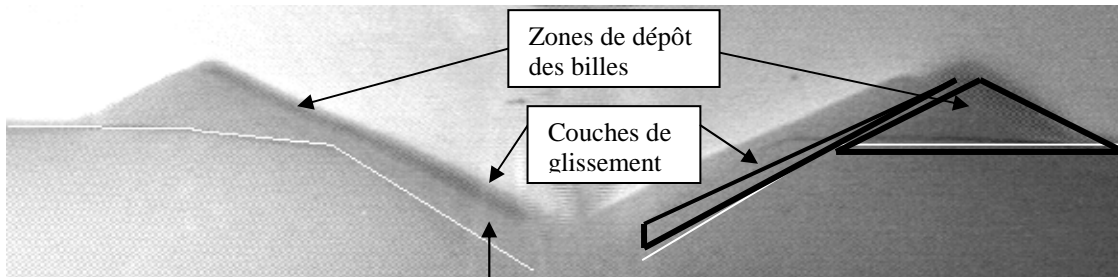
Dans le cadre des grosses billes ( $R > 250 \mu m$ ) le système a tendance à former un canal qui s'effondre rapidement, on a donc des régimes d'émission intermédiaires. Pour les petites billes par contre, si le système réussit à creuser un canal (à fort débit par exemple) il va rester dans cet état qui est très stable : les événements perturbatifs ne seront pas suffisants pour mettre en défaut la cohésion des grains formant les parois du canal.

Mouvements dans la couche et zones de déplacements :

Au cours de la formation du cratère, seule la zone centrale de la couche (au-dessus du trou d'injection) est mise en mouvement. On observe ainsi, en fin d'expérience, deux zones bien distinctes dont les formes dépendent du régime d'émission ayant formé le cratère :

Pour le mode continu, on observe que la zone ayant été en mouvement est formée de quatre triangles. Les deux triangles (symétriques /trou d'éjection) situés vers le centre correspondent aux couches de glissement sur les flans intérieurs. Les deux autres triangles sont le résultat du dépôt des grains.

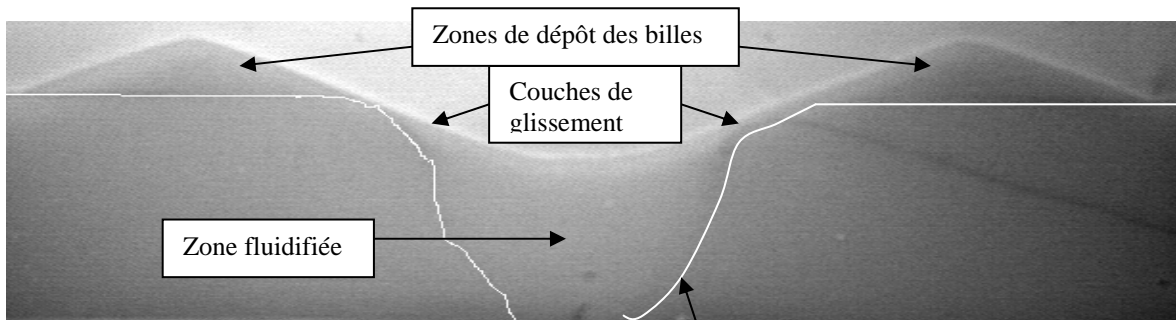
**Image du profil final en régime continu : visualisation des zones de déplacements :**



frontière entre la zone immobile et celle mise en mouvement

Pour le régime fluide, on observe toujours les quatre triangles mais on voit aussi qu'une zone de mouvements supplémentaire est apparue : c'est une zone qui se situe au sein de la couche et qui montre donc l'existence de mouvements de convection autour de la zone d'émission (cf. § suivant).

**Image du profil final en régime fluide : visualisation des zones d'équidensité :**



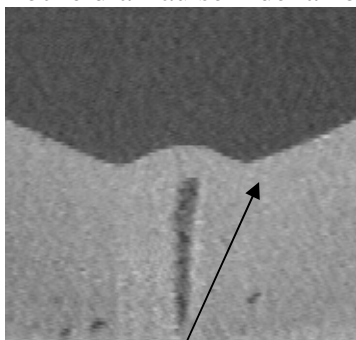
frontière entre la zone immobile et celle mise en mouvement

Formation de bulles au sein de la couche :

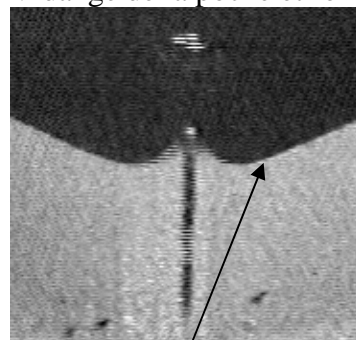
En fait la zone supplémentaire observée dans le cas du régime fluide vient des mouvements de la suspension de bille lors de la montée de poches d'air. En effet, lorsque des poches d'air montent dans la couche fluidifiée, les grains sont d'abord repoussés par le front de la poche puis on observe un glissement des billes sur les bords de la poche pour contourner celle-ci et la refermer plus bas.

**Emission d'une bulle en régime fluide :**

Poche d'air au sein de la zone fluide



Vidange de la poche et formation de bulles

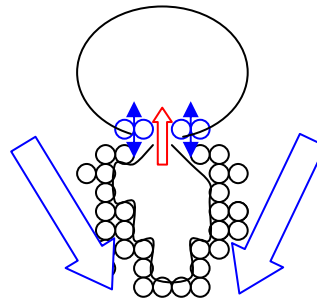
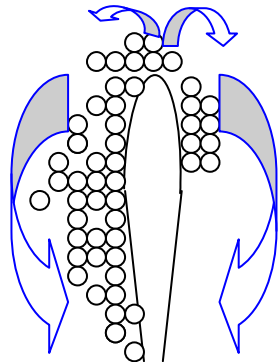


Pincement de la

Grains écartés par la poche d'air

poche  
Clapet de billes

### Schéma de l'émission :



les grosses flèches montrent les mouvements des grains

les petites flèches montrent les mouvements d'air

les doubles flèches montrent le mouvement du clapet formé par les billes de l'interface

Le premier schéma montre la poche d'air montant dans la couche fluidifiée en écartant les billes pour se frayer un passage. Une fois que la poche se rapproche de la surface de la couche, elle se crée un passage à travers les dernières rangées de billes et commence à former des bulles.

Le deuxième schéma montre donc la formation de ces bulles, où les billes représentées en bleu jouent le rôle d'un clapet qui laisse s'échapper des billes de plus en plus petite. La diminution de la taille des bulles est due à la décompaction des grains formants le clapet qui entraîne la diminution de la pression de seuil (pour le percer). C'est donc au moment de la formation des bulles que l'on observe les mouvements les plus importants dans la zone fluidifiée et on peut aussi mettre en évidence les caractéristiques de ces déplacements à l'aide de billes marquées (ceci sera traité dans le paragraphe suivant).

Plongeon de la couche superficielle en régime fluide :

En observant le cratère final, on observe une ligne longeant la zone fluide et cette ligne semble être formée par les grains qui se situent à l'origine à la surface de la couche (car on y retrouve les impuretés qui s'étaient déposées après le brassage à l'interface bille/eau).

Pour vérifier ces observations, j'ai utilisé des billes colorées (de propriétés similaires à celles formant la couche) que j'ai déposées à la surface du lit de billes avant de lancer l'expérience.

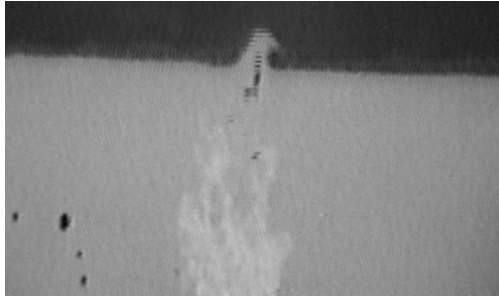
On peut ensuite suivre le mouvement de ces marqueurs au cours de la formation du cratère. On se rend ainsi compte que lors de l'émission des bulles (décrite au § précédent) il y a des cisaillements qui s'établissent dans la zone fluide et que ceux-ci entraînent le plongeon des marqueurs à la limite de cette zone.

C'est donc pour compenser l'espace libéré par la matière éjectée que les billes de la surface descendent au fond de la couche.

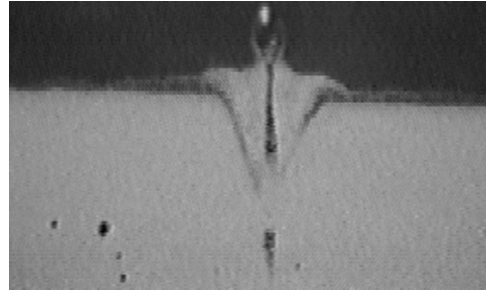
### Descente de la couche supérieure initiale autour de la zone fluidifiée :

Couche à l'interface au temps initial

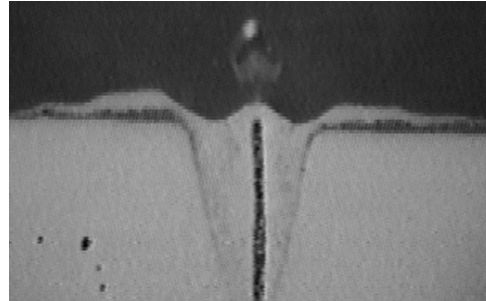
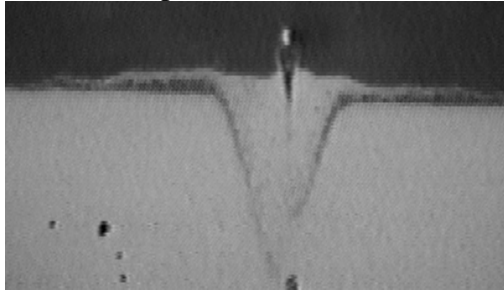
Début du plongeon de la couche



Début du dépôt de sable sur la couche colorée



Zone fluide finale (forme finale)



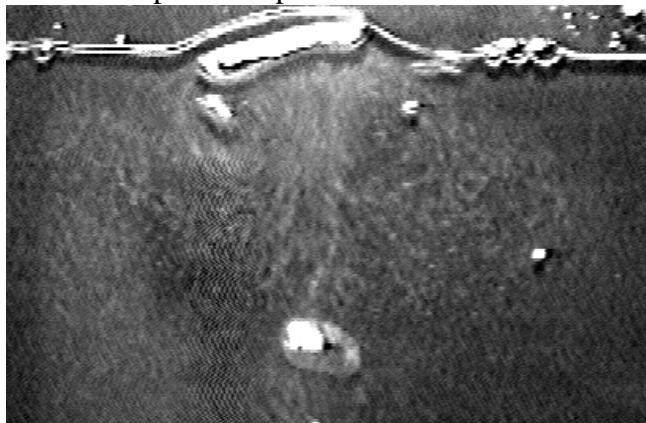
## MOUVEMENT DE L'EAU ET TRANSPORT DES BILLES :

Différents écoulements observés :

Suivant la valeur de nombreux paramètres, les écoulements dans l'eau peuvent changer de forme et de taille :

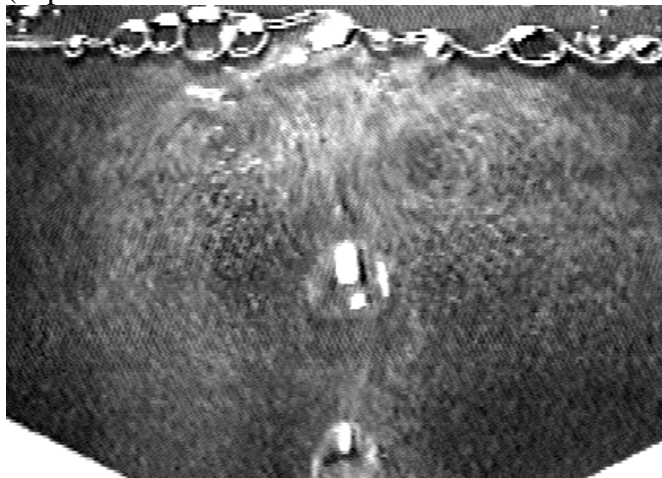
Leur forme varie suivant le régime d'émission des bulles. Les deux différents écoulements sont :

L'écoulement 'explosif' qui prend la forme d'un champignon nucléaire : il est dû à des émissions en train de bulle pour lesquelles toutes les bulles émises arrivent à la surface dans un court laps de temps.



Tourbillons  
uniquement à la

L'écoulement en forme de rouleau : il est présent dans le cadre des régimes continus car la montée ininterrompue de bulle nécessite l'établissement d'un écoulement de forme cyclique (expulsion du fluide en haut et entraînement du fluide en bas )



Tourbillons et  
rouleaux occupant  
tout l'espace au-  
dessus du cratère

Leur taille elle dépend de beaucoup de paramètres car c'est la vitesse de montée des bulles et les limites géométriques du système qui conditionne leur portée :

Pour l'écoulement 'explosif', qui se produit en régime fluide, la largeur du champignon dépend du rapprochement entre les bulles émises dans le même train. Ceci rend leur portée assez variable car la taille des poches d'air formées dans la couche est variable durant une même expérience : cette variation entraîne un changement au niveau de la taille des bulles émises ainsi que leur espacement (nous verrons au § suivant le rôle de l'espacement des bulles dans la portée de l'écoulement ).

Pour les rouleaux, leur taille peut être imposée par le débit, les talus du cratère, la hauteur d'eau ou même les bords de la cuve ( pour la cuve d'origine ) suivant le paramètre limitant. Ainsi, la vitesse de l'écoulement est imposée par la vitesse de montée des bulles et dépend donc à la fois de la hauteur d'eau et du débit. Mais la taille n'est pas uniquement conditionnée par la vitesse du fluide, elle dépend aussi de l'espace disponible au fluide pour former les cercles de ses rouleaux ; ce qui fait donc rentrer en jeu la hauteur d'eau et l'écartement des talus. En effet, comme l'écoulement met en mouvement le maximum de fluide, le paramètre

limitant est celui qui a la plus petite distance au centre des rouleaux et c'est donc lui qui fixe le rayon de l'écoulement.

Influence de la montée des bulles :

La taille maximale des écoulements est dictée par la vitesse du fluide et donc par la vitesse de montée des bulles. Mais la montée des bulles dépend de nombreux paramètres : taille (reliée à Heau et au débit), distance entre les bulles successives.

Tout d'abord, l'augmentation de la taille des bulles conduit à une augmentation de leur vitesse de montée : le terme de pesanteur  $\Delta\rho \cdot g \cdot R^3$  qui accélère la bulle croît plus vite que le terme de Stocks :  $6\pi \cdot \eta \cdot R \cdot v$ . Mais cette taille dépend à la fois de la hauteur d'eau et du débit (ainsi que du régime) : la taille des bulles dépend de la différence de pression entre l'interface bille/eau et l'injection. L'augmentation du débit à Heau fixée fait croître la taille des billes alors que l'augmentation de Heau à débit fixé réduit leur taille. Donc à fort débit et Heau élevée, la vitesse de montée devrait être maximale.

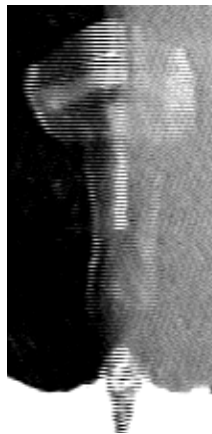
Mais l'espacement entre l'émission de deux bulles successives joue aussi un rôle important dans la vitesse de montée. En effet, on observe un phénomène de collapse des bulles lorsqu'elles sont suffisamment rapprochées.

### **Image du collapse de deux bulles en régime fluide :**

La 2<sup>ème</sup> bulle est attirée par la traînée de la 1<sup>ère</sup>



Les deux bulles commencent à se regrouper



Les bulles ne forment plus qu'une



On voit sur les images que pour rattraper la grosse bulle, la 2<sup>ème</sup> bulle accélère très rapidement et prend donc une vitesse supérieure à celle dictée par sa taille : le collapse des bulles influence donc la vitesse de montée et donc la taille des rouleaux. Il faut aussi noter que ce phénomène dépend de l'espacement entre les bulles mais aussi de la taille de la première bulle mise en jeu. C'est ce deuxième point qui facilite l'apparition de collapse pour le régime fluide (car la première bulle émise est plus grosse). Ce phénomène est donc rare pour le régime continu mais peut être observé pour un fort débit et une grande hauteur d'eau.

On peut donc conclure que la vitesse de montée des bulles est bien fixée pour le régime continu : on observe donc des rouleaux de taille fixée par les limites géométriques du système ; alors que pour le régime fluide, la vitesse peut varier brusquement en raison d'un collapse de deux bulles et la portée des explosions est donc variable au cours de l'expérience.

### **Conclusion :**

On vient de voir les différents paramètres entrant en jeu dans la formation des écoulements et conditionnant leur taille. Mais il faut noter que certains des critères évoluent au cours de l'expérience et peuvent ainsi conduire à des changements radicaux sur la formation du cratère.

Il est donc très difficile, lors de l'exploitation des résultats d'une expérience, de savoir si les écoulements ont été entretenus de la même manière tout au long de l'expérience ou si un événement a perturbé le système.

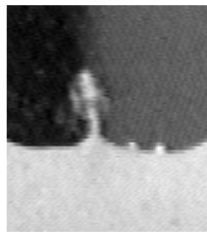
Transport des billes :

Le transport des billes s'effectue en deux stades qui consistent en la montée des billes dans le sillage des bulles puis le transport dans les écoulements de l'eau.

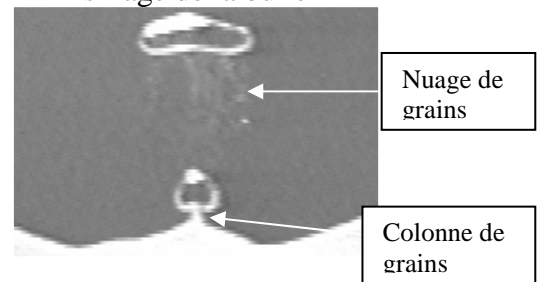
- Les billes sont d'abord soulevées, du fond du cratère vers l'interface eau/air, par les turbulences présentes derrière les bulles.

### Visualisation de la montée des grains dans le sillage d'une bulle :

1.1 Image de la colonne de billes



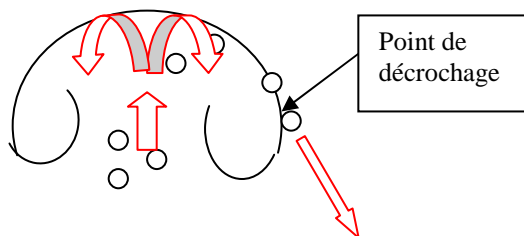
Visualisation du nuage de billes dans le sillage de la bulle



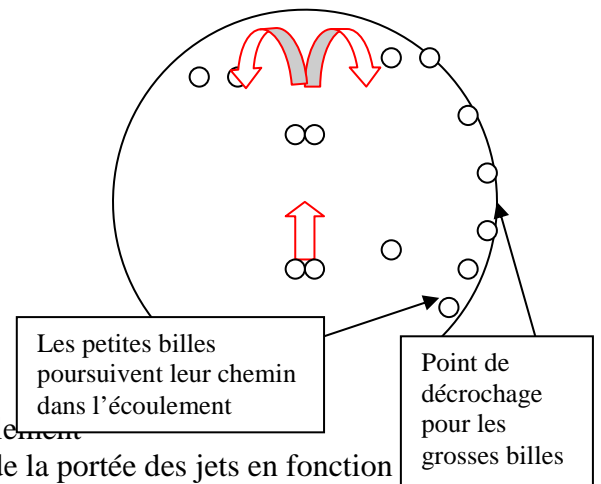
- Une fois que les billes sont mises en suspension dans l'eau, elles subissent à la fois l'entraînement par les écoulements et les forces de pesanteur qui tendent à les faire chuter. Suivant la taille des billes utilisées, on observe qu'elles suivent plus ou moins l'écoulement ambiant : pour des billes de grande taille, c'est la pesanteur qui l'emporte et les billes sortent rapidement des rouleaux. Cette compétition entre les deux effets modifie la portée des jets suivant la taille des billes. Mais les différences sont plus importantes pour le régime continu car l'écoulement est circulaire ; pour le régime fluide, on a uniquement un champignon à la surface et les billes (quelle que soit leur taille) tombent (poids + viscosité) aux extrémités du champignon.

### Schéma des mouvements des billes dans l'eau :

Écoulement en champignon :



Écoulement en rouleaux :



⇒ Les flèches représentent les mouvements des grains

— Les traits représentent la forme de l'écoulement

Je n'ai pas réalisé d'étude quantitative de l'évolution de la portée des jets en fonction de la taille des billes car l'épaisseur de la cuve rend difficile la manipulation avec les grosses billes et surtout il n'est pas possible de se placer dans les mêmes conditions pour les différents

diamètres de grains : pour Pentrée, Heau et Hsable fixés les régimes d'émission sont différents suivant la taille des billes et il n'y a donc pas de sens de comparer les portées.

Après ces deux phases de transport, les billes sont déposées sur le lit de grains où elles vont subir des glissements (partie traitée dans le chapitre suivant).

### 1. Etude des angles de glissement :

Les granulaires sont des matériaux ayant la particularité de pouvoir donner lieu à des cisaillements lorsqu'ils sont inclinés. L'angle caractéristique de cisaillement dépend de la présence d'écoulements à la surface du lit de bille. Ainsi dans le cadre de la formation des cratères sous l'eau, les écoulements du fluide vont influencer la pente des différents flans du cratère. Les angles de glissements vont donc dépendre des paramètres que l'on impose : Heau, Pentrée (qui vont conditionner le type d'écoulement). Je n'étudierai pas l'influence de la taille des billes (pour des raisons déjà mentionnées) et les hauteurs de sable mises en jeu n'auront pas d'influence sur l'angle car elles sont suffisamment grandes pour ne pas intervenir.

Ces phénomènes de glissements ont lieu lors du dépôt des grains : une fois sorties de l'écoulement, les billes tombent sur les côtés du trou d'éjection et s'amoncellent jusqu'à atteindre les angles limites de glissement.

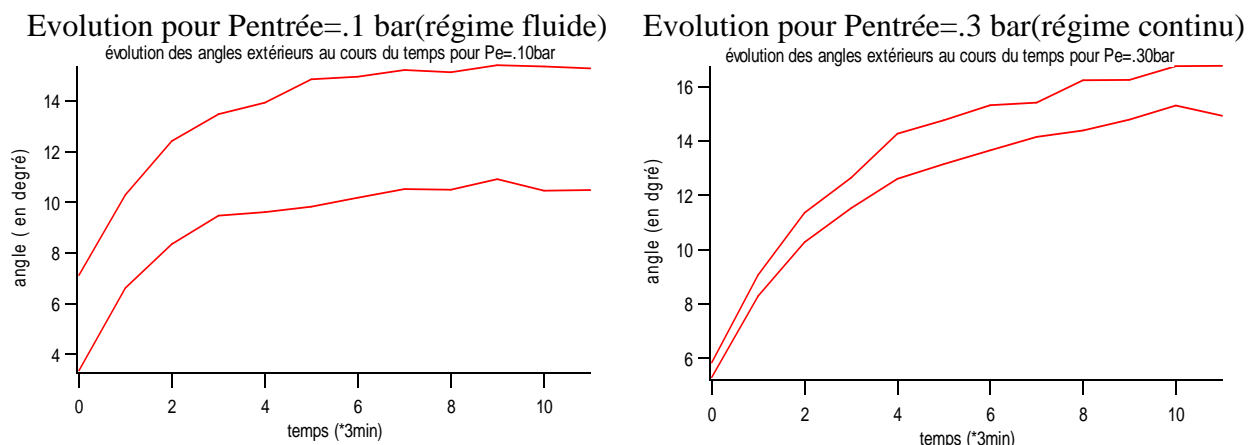
#### 4.1 Evolution des angles extérieurs du cratère :

L'angle formé par les grains déposés au-delà des sommets du cratère varie peu selon le régime d'émission car les convections du fluide au-dessus de ce flan sont faibles.

En effet, si l'on se place dans le cas où la taille des rouleaux est fixée par le cratère, les rouleaux ne dépassent pas les sommets et donc il n'y a pas de mouvements du fluide au-dessus du flan considéré : on a donc l'angle de glissement au repos.

Dans le cas où les rouleaux dépassent les sommets, on observe une légère convection qui va dans la direction du trou d'émission et l'angle de glissement est donc plus grand.

### Evolution des angles extérieurs pour différents débits :



En fait, l'angle critique extérieur n'est pas atteint dès le début de l'expérience car les billes déposées au-delà du sommet ne sont pas très nombreuses. On voit ainsi une augmentation de l'angle extérieur puis une stabilisation lorsqu'il atteint sa valeur critique.

On voit que la valeur limite atteinte par les angles extérieurs est plus grande dans le cas du régime continu car il y a des convections au-dessus des flans extérieurs.

#### 4.2 Evolution des angles intérieurs du cratère :

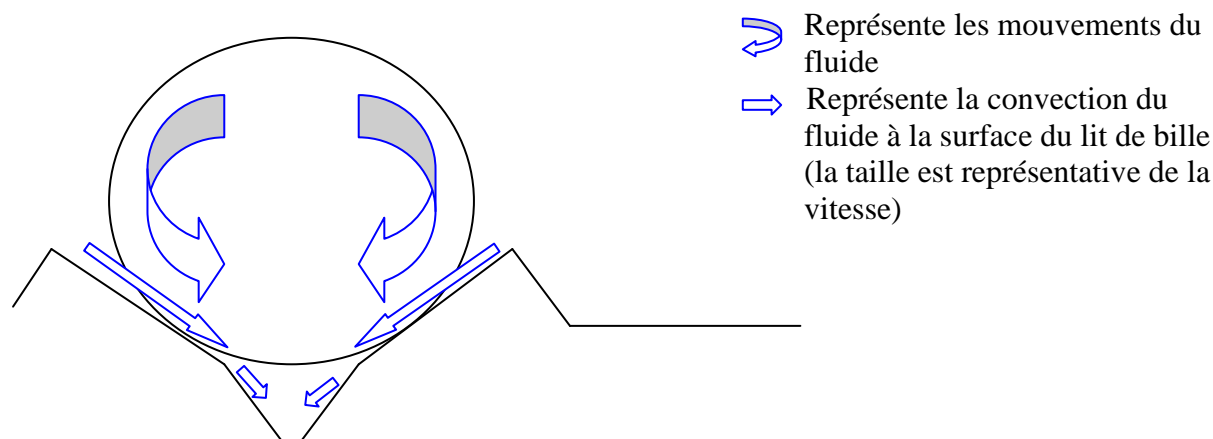


Les flans internes du cratère sont toujours soumis à des convections du fluide. Suivant le régime et la taille des rouleaux, on observe un ou deux angles limites.

En effet, on peut observer deux zones distinctes : une où la convection est du à la montée des bulles qui attirent le fluide et une où c'est le retour des rouleaux qui crée la convection.

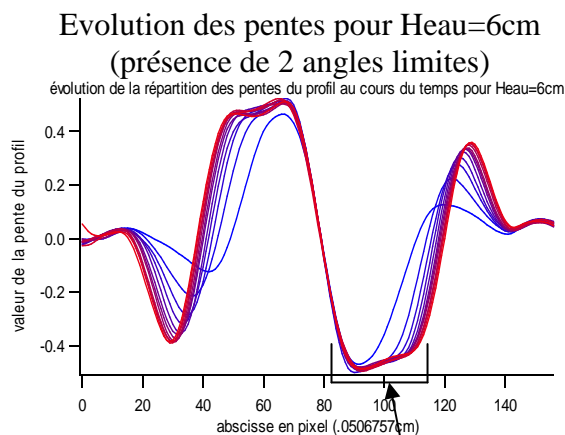
On peut aussi noter que l'angle limite est atteint plus rapidement à l'intérieur car il y a plus de matière mise en jeu.

### Schéma de la situation à 2 angles limites :

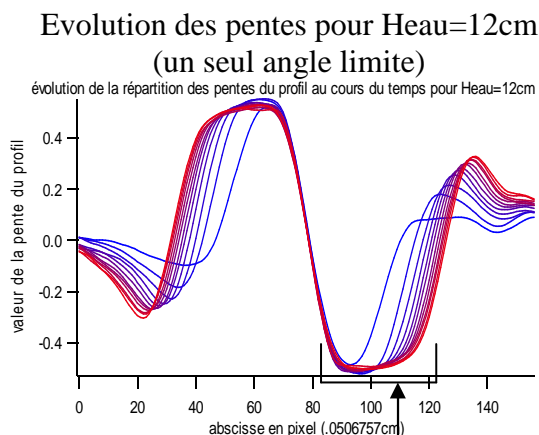


On voit d'après le schéma que dans cette situation, on devrait observer un angle de glissement plus grand pour la zone centrale (proche du trou du cratère) car la convection, qui tend à faire chuter les billes, est plus faible.

### Evolution des pentes du profil pour différentes hauteurs d'eau :



On observe deux paliers de pentes : celui de gauche correspond à la pente près du trou



On observe dans ce cas un seul palier de pente ce qui correspond à un seul angle limite

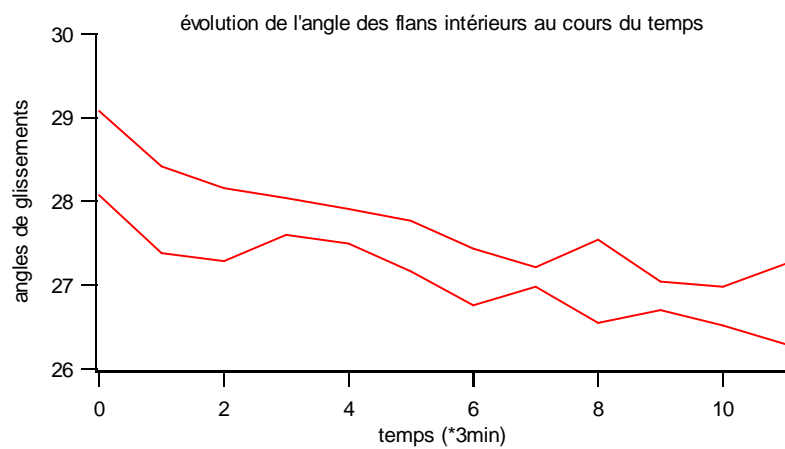
Ces évolutions des pentes du profil sont obtenues par dérivée de la courbe du profil, elles représentent donc la pente du profil en fonction de l'abscisse considérée. Les changements de teinte correspondent à l'évolution dans le temps.

On peut observer les deux cas possibles : un et deux angles limites, le cas deuxième cas est obtenu pour de faibles hauteurs d'eau associées à de forts débits (car il faut nécessairement des rouleaux).

De plus, les angles limites intérieurs peuvent parfois évoluer au cours de l'expérience (on parle bien de l'évolution de l'angle limite).

En effet, lorsque la taille des rouleaux est imposée par le cratère, sa formation va entraîner une évolution de l'angle limite. Je n'expliquerai pas ce phénomène car je n'ai fait qu'observer son existence (l'explication faisant rentrer trop de paramètres en jeu).

### **Evolution de l'angle limite pour Heau=3cm et Pentrée=.3bar :**



On observe une diminution de l'angle limite intérieur au cours du temps ce qui traduit l'augmentation de la vitesse de convection du fluide à la surface du lit de billes (peut être reliée à la diminution de la taille des rouleaux).

## **I. ETUDE GLOBALE DE L'EVOLUTION DU CRATERE :**

Après l'introduction de tous les phénomènes intervenants, on peut étudier la formation du cratère dans sa globalité. On étudiera l'influence de la hauteur d'eau, de la hauteur de sable et du débit tout en remarquant les changements de régimes d'émission et les limitations géométriques du système.

L'étude sur la grande cuve à mise en évidence l'influence des bords pour les expériences réalisées avec la petite cuve. Les résultats qui suivent seront donc tirés des expérimentations avec la grande cuve.

#### 4. Influence de la hauteur d'eau :

On étudie l'influence de la hauteur d'eau à  $P_{entrée}=.25\text{bar}$  et  $H_{sable}=3\text{cm}$  fixés.

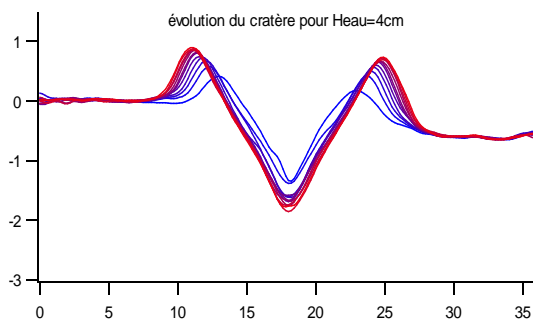
##### 1.1. Evolution des coordonnées des sommets au cours du temps :

Les coordonnées des sommets évoluent de manière logarithmique : croissance rapide au temps faibles et croissance de plus en plus lente pour les temps longs.

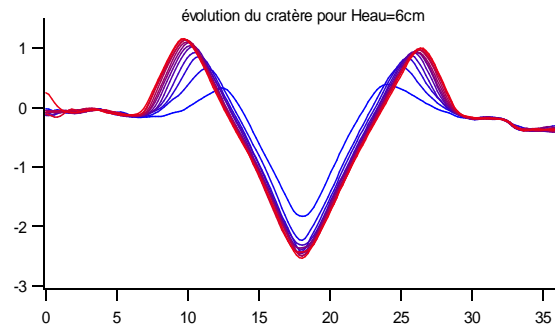
En faisant varier la hauteur d'eau, on observe un changement des pentes à l'origine et une variation de la portée des jets.

#### Visualisation de l'évolution du cratère pour différentes hauteurs d'eau :

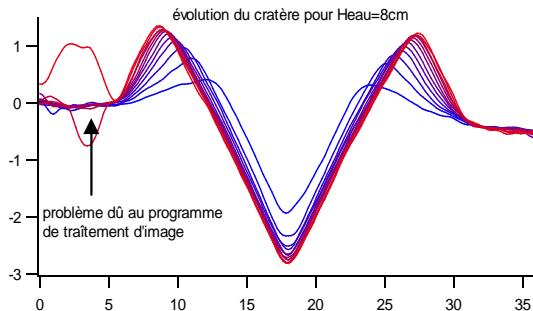
Evolution au cours du temps pour  $H_e=4\text{cm}$



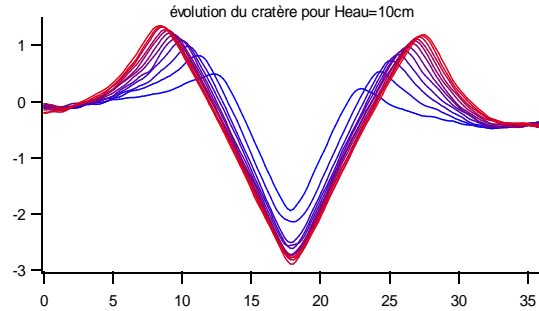
Evolution au cours du temps pour  $H_e=6\text{cm}$



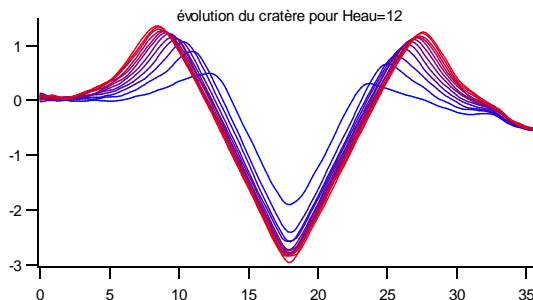
Evolution au cours du temps pour  $H_e=8\text{cm}$



Evolution au cours du temps pour  $H_e=10\text{cm}$



Evolution au cours du temps pour  $H_e=12\text{cm}$



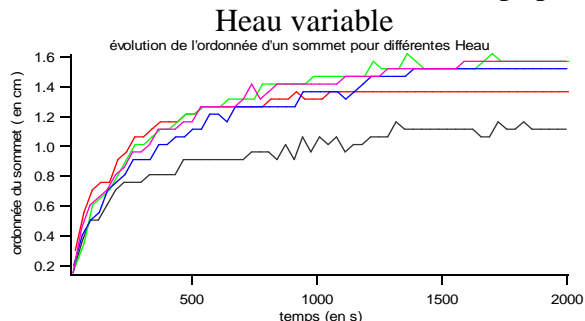
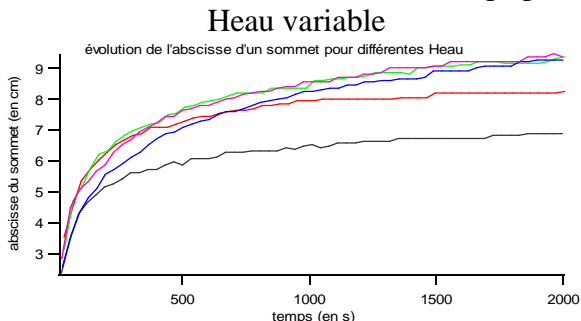
Pour des hauteurs d'eau comprises inférieures à 10 cm, on observe un élargissement du cratère, ainsi qu'un abaissement du trou. Ces évolutions n'apparaissent plus à partir de

Heau=10 cm ; ceci s'explique par la limitation par le bas de la cuve : en effet, le trou du cratère à atteint le fond de la cuve et n'a donc plus de billes à éjecter.

Nous allons voir plus précisément les changements d'évolution en fonction de Heau à l'aide des courbes des coordonnées.

### Courbes d'évolution des coordonnées au cours du temps pour différentes hauteurs d'eau :

Abscisse du sommet au cours du temps pour Ordonnée du sommet au cours du temps pour



Les courbes ont un code couleur : noir, rouge, vert, bleu, rose correspondent respectivement à Heau=4, 6, 8, 10, 12 cm.

On peut remarquer que les pentes à l'origine sont difficilement exploitables car le début de la formation du cratère n'est pas reproductible : il est influencé par des événements que l'on ne peut rendre reproductibles, la digitation varie aléatoirement car la disposition microscopique des grains ne peut être contrôlée.

On peut par contre observer les temps critiques et les valeurs 'asymptotiques'.

En effet, on voit que pour les trois courbes valides (pas de limitation extérieure) le temps pour lequel la croissance semble brusquement diminuer (temps critique) augmente avec la hauteur d'eau.

De plus on observe que la valeur asymptotique des coordonnées augmente avec Heau.

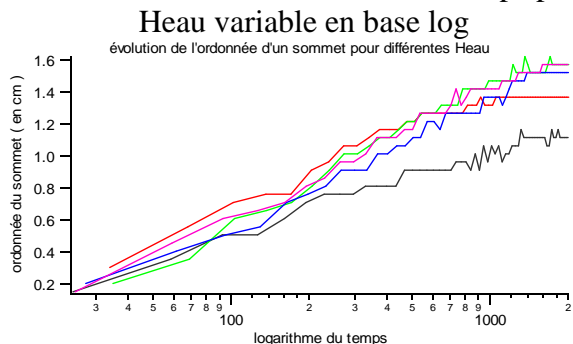
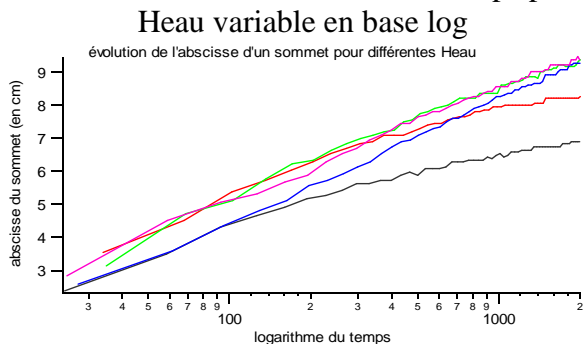
Nous allons étudier la variation de la portée pour un temps long (fixé à 30 min) en fonction de Heau.

On n'étudiera pas les temps critiques en fonction de Heau car leur définition rigoureuse se base sur la pente à l'origine et n'a donc pas vraiment de sens.

1.2. Evolution de la largeur et de la hauteur du cratère en fonction de la hauteur d'eau :

### Courbes d'évolution des coordonnées au cours du temps (en base logarithmique) pour différentes hauteurs d'eau :

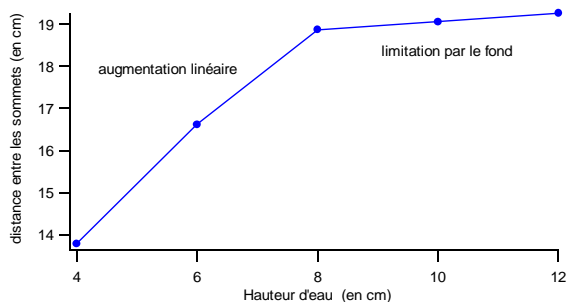
Abscisse du sommet au cours du temps pour Ordonnée du sommet au cours du temps pour



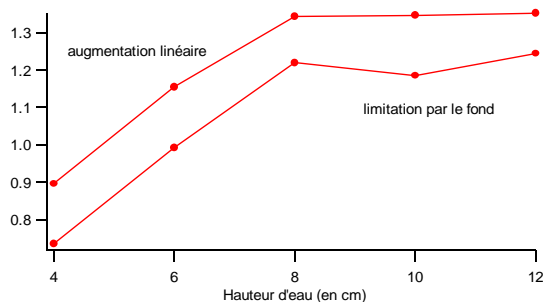
On peut brièvement remarquer que le comportement des coordonnées est bien logarithmique par rapport au temps comme le montre ces droites en base log.

### Evolution de la portée en fonction de la hauteur d'eau :

Largeur du cratère (à t=30min) en fonction de Heau



Ordonnées des sommets (à t=30min) en fonction de Heau



Grâce à ces courbes, on peut voir que la largeur et la hauteur des cratères varient linéairement en fonction de la hauteur d'eau, jusqu'à atteindre la limitation géométrique du système : limitation par le fond.

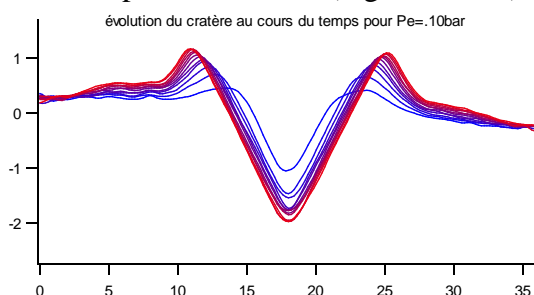
## 2. Influence du débit ( Pentrée ) :

On étudie l'influence du débit à Heau=8cm et Hsable=3cm fixés.

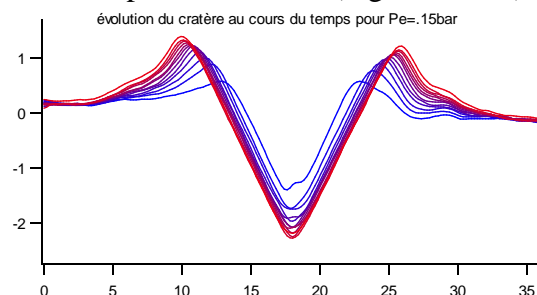
### 2.1. Evolution du cratère au cours du temps pour différents débits :

#### Formation du cratère pour différentes pressions d'entrée :

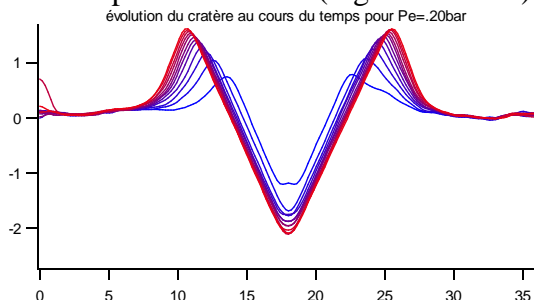
Cratère pour Pe=.10bar (régime fluide)



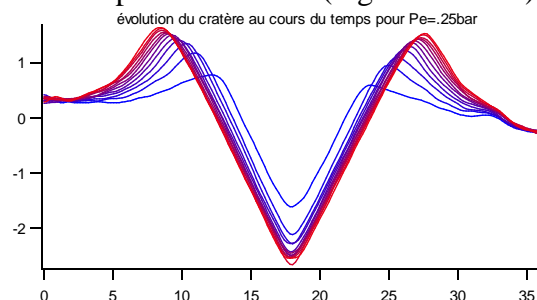
Cratère pour Pe=.15bar (régime fluide)



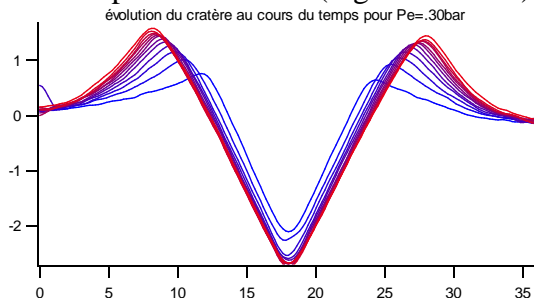
Cratère pour Pe=.20bar (régime continu)



Cratère pour Pe=.25bar (régime continu)



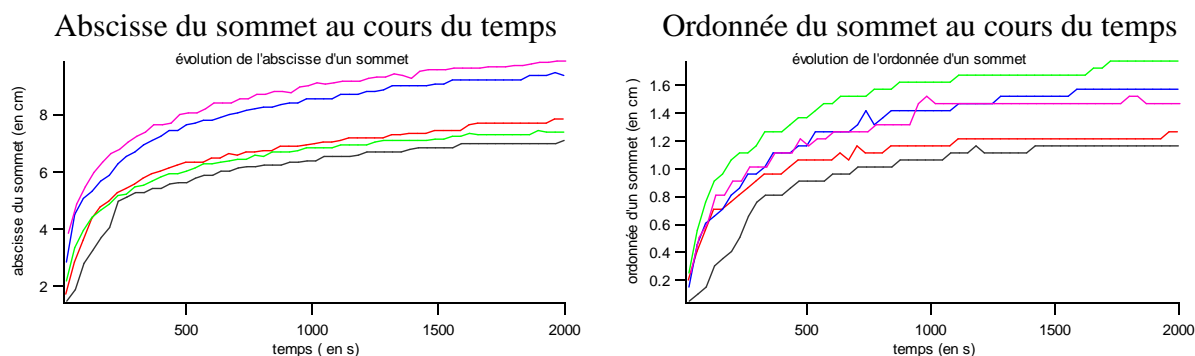
Cratère pour Pe=.30bar (régime continu)



On remarque sur ces graphiques que plus on augmente le débit, plus les pentes intérieures sont faibles ce qui peut s'expliquer par l'apparition de rouleaux et donc de convections à l'intérieur du cratère.

De plus, pour  $P_{entrée} = .3\text{bar}$  on voit que les flans intérieurs ne conservent pas la même pente : elle diminue au cours du temps ; ce phénomène, qui n'est pas observé pour les autres expériences est dû à l'interaction entre la taille du cratère et la taille du rouleau.

### Evolution des coordonnées au cours du temps pour différentes $P_{entrée}$ :



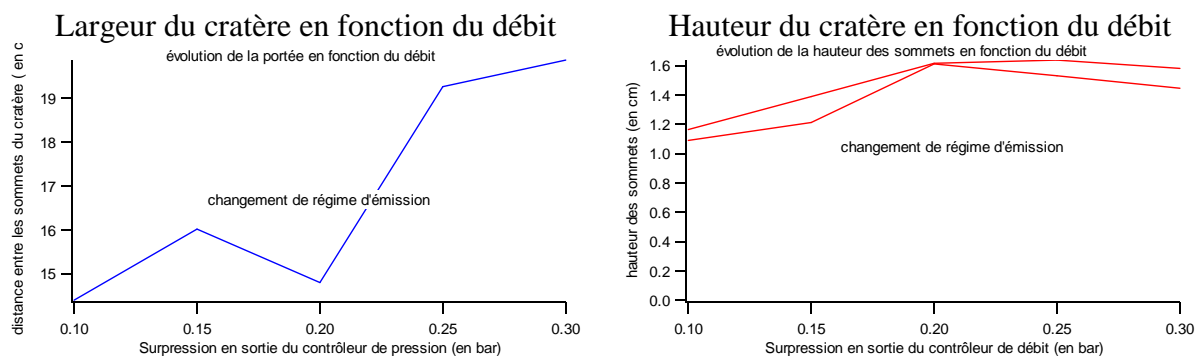
On utilise toujours les codes de couleurs dans l'ordre croissant.

On peut remarquer que la courbe verte ( $P_{e} = .20\text{bar}$ ) se démarque des autres. En effet, on voit que pour les autres expériences, l'augmentation du débit fait croître la valeur asymptotique de l'abscisse. En fait  $P_{entrée} = .2\text{bar}$  correspond à un régime critique entre le fluide (.10 et .15bar pour les conditions de Hsable et Heau) et le régime continu (.25 et .3bar).

Pour l'ordonnée du sommet, on observe un comportement bien différent avec un inversement de l'évolution des valeurs asymptotiques : croissance pour  $P_{entrée}$  variant de .1 à .2bar puis décroissance pour les forts régimes. Ce phénomène est dû à l'augmentation de la convection qui arrache des billes du sommet.

### 2.2. Evolution des dimensions du cratère en fonction du débit :

#### Evolution de la hauteur et de la largeur du cratère en fonction du débit à $t = 30\text{min}$ :



Sur ces deux graphiques on peut mettre en évidence les observations faites avant : la pression d'entrée .20 bar correspond effectivement à un régime critique. On voit que l'abscisse du sommet croît plus rapidement pour des augmentations de débit en régime fluide qu'en régime continu car les convections n'augmentent pas dans le régime explosif.

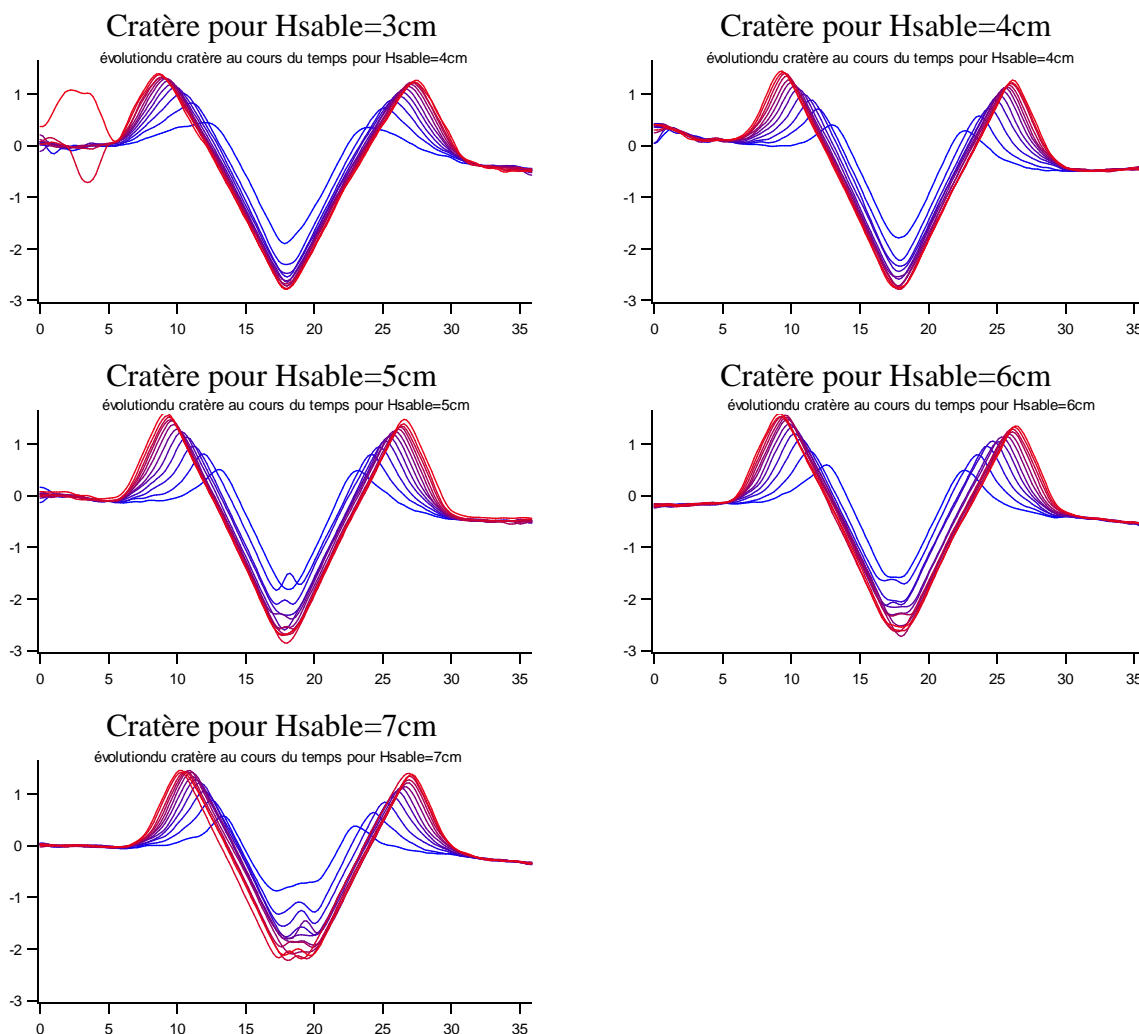
Pour la hauteur du sommet, on retrouve les observations précédentes (§ 2.1)

### 3. Influence de la hauteur de sable :

#### 3.1. Evolution dans le temps pour différentes hauteurs de sable :

On s'attend à ce que la hauteur de sable ne joue pas de rôle dans l'évolution du cratère.

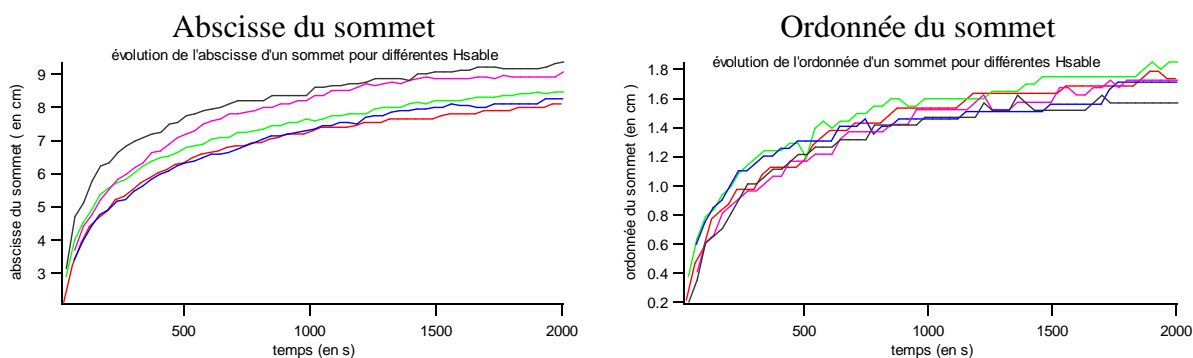
#### Formation du cratère pour différentes hauteurs de sable



Il semble, d'après ces graphiques, que la hauteur de sable n'a en effet pas d'influence sur les dimensions du cratère.

On observe par contre des dômes dans le creux du cratère pour H<sub>sable</sub>=7cm ce qui est caractéristique d'un régime fluide.

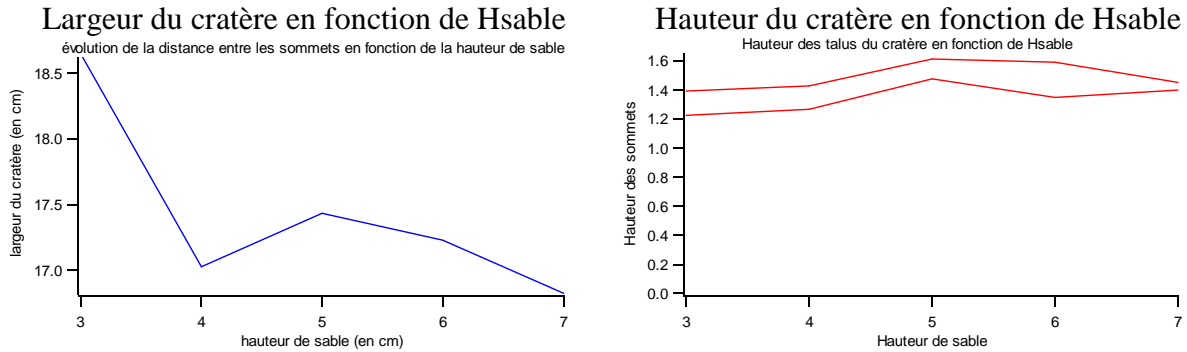
#### Evolution des coordonnées pour différentes hauteurs de sable :



Les courbes semblent toutes suivre la même évolution ( les écarts sont négligeables).

3.2. Evolution des dimensions du cratère en fonction de Hsable :

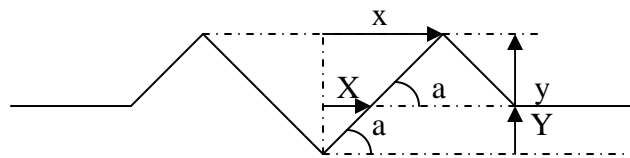
**Graphiques de la largeur et hauteur du cratère en fonction de Hsable :**



On peut confirmer que la hauteur de sable n'influence pas les caractéristiques du cratère car les écarts sont négligeables ( attention le graphe de la largeur n'est pas forcé à zéro ).

4. Linéarité de l'abscisse en fonction de l'ordonnée :

En utilisant un modèle simple qui considère un unique angle limite, on arrive à une expression linéaire de l'abscisse en fonction du temps.



On a :  $(X*Y)/2 = (x-X)*y$  par conservation des grains (vol soulevé = vol déposé)

De plus :  $Y/X = y/(x-X) = \tan(a)$

Donc :  $x = (Y+y)/\tan(a)$

Il faut noter que ce résultat nécessite que les angles de glissements soient les mêmes (intérieur et extérieur). Ce résultat est donc vérifié pour les régimes d'émission où les convections sont faibles : régime fluide avec une grande hauteur d'eau.



## **CONCLUSION :**

Mon travail a donc été basé sur l'aspect qualitatif de la formation des cratères, mon but étant de montrer la complexité des interactions entre les petits phénomènes mis en jeu.

A travers ces différentes expériences à paramètres variables, on peut tirer des conséquences sur l'influence de la hauteur d'eau, de sable et du débit.

Les plages d'essai pour ces différents paramètres ne sont pas très grandes mais donnent un aperçu des évolutions.

On a donc mis en évidence que la portée dépend linéairement de la hauteur d'eau (en l'absence de limitation géométrique). Pour sa dépendance par rapport au débit, on a observé l'influence du changement de régime et on a pu aussi remarquer que l'influence du sable est très faible : le changement de régime pour  $H_{\text{sable}}=7\text{cm}$  n'a pas été ressenti par le système.

Le sujet de la formation des cratères est loin d'être cerné car on peut s'attendre à de nouveaux phénomènes pour des paramètres plus extrêmes et tout n'a pas été interprété dans les domaines étudiés.

On pourra poursuivre cette étude en s'attardant sur l'influence de la formation aux temps faibles sur le comportement asymptotique. Il peut être intéressant d'étudier plus en détail l'émission des bulles en régime fluide ainsi que les interactions entre la taille des rouleaux et celle du cratère.

La modélisation théorique du système reste encore très difficile et nécessite au préalable une longue expérimentation.