

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Ahmed Draia - Adrar  
Faculté Des Sciences Et De La Technologie  
Département Des Sciences De La Matière



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
DE MASTER EN PHYSIQUE ENERGETIQUE ET ENERGIES  
RENOUVELABLES

## Thème

**L'impact des fractales sur les écoulements  
rampants étude du cas "amas de sable"**

Soutenu le : .../...../ 2020

Présenté par :

*M<sup>elle</sup> RAFAI Hadjira*

*M<sup>elle</sup> BOUHAMID Fatima*

Encadreur :

Dr. BOUSSOUKAIA Tahar

*Université d'Adrar*

Examineur :

*Mr. OMARI Boumediene*

*Université d'Adrar*

*Dr. KHALLADI Med Fadel*

*Université d'Adrar*

Année Universitaire 2019/2020



## ملخص

يؤثر سيلان المياه على المناظر الطبيعية في أشكال مختلفة من التآكل. سنهتم هنا بالانجراف الحبيبي و خاصة في تأثير الكسور على شكل كومة من الرمال تتعرض لتدفق مستمر من الماء ينساب على سطح الكومة حيث تظهر هذه الكسور في شكل تجاعيد تصاحب نقل حبيبات الرمل . هذه الظواهر تثير العديد من الأسئلة حول تشكلها و تطورها ، وتظل غير مفهومة بشكل جيد. أخيراً، سوف نرى أن تحرك حبيبات الرمل السطحية تحت تأثير جريان الماء يمكن ان تساعدنا في الكشف عن الكثير من الأسرار حول مورفولوجيا المناظر الطبيعية .

الكلمات المفتاحية : كومة من الرمل، كسور، تجاعيد، الماء، تآكل،

## Résumé

Là où l'eau est omniprésent, son action est aggravée sur les paysages en différentes formes d'érosions. Nous allons ici nous intéresser à un écoulement granulaire et spécialement à l'effet de fractalisation d'un amas de sable subit à un écoulement d'eau cisailant sa surface à travers des fractales en forme de rides qui accompagnent le transport des grains de sable. Ces phénomènes suscitent de nombreuses questions quant à leur formation et leur évolution, et demeurent mal compris. Enfin, nous verrons que le sable peut nous aider à dévoiler beaucoup de secrets sur la morphologie des paysages .

**Mots-clés:** amas de sable, fractale, rides, eau, érosion

## Abstract

The abundance of water affects the landscape in various forms of erosion. Here we will pay attention to granular erosion, especially in the effect of fractures on a pile of sand subject to a continuous flow of water flowing over the surface of the pile, where these fractures appear in the form of wrinkles accompanying the transport of sand grains. These phenomena raise many questions about their formation and evolution, and remain poorly understood. Finally, we will see that the movement of external sand grains under the influence of water flow can help us uncover many secrets about landscape morphology.

**Keywords:** pile of sand, fractal, ripples, water, erosion

## *Remerciements*

*Tout d'abord, je voudrais remercier Dieu Tout-Puissant, qui m'a donné la force, l'intelligence et la patience pour faire ce travail humble.*

*À l'effusion d'amour et à la source de compassion et de tendresse, à la première et la plus mince parole que retient la langue de la mère de la tendresse*

*À ceux qui nous ont élevés, pasteur nous, et ont ouvert les portes devant nous, qui nous ont honorés en portant notre cher nom*

*Pour soutenir dans la vie, chers frères et sœurs, et à toutes les deux familles généreuses*

*Je remercie le professeur Dr. T. BOUSSKAIA, en tant que directeur de thèse, qui m'a soutenu et guidé dans mon travail et m'a aidé à trouver des solutions pour l'avenir.*

*Je remercie sincèrement M. B. OMARI et le Dr. M, F. KHALLADI ; Respectivement co-directeur et superviseur de ce travail ; Ils ont toujours été très attentifs et disponibles lors de la production de ce résumé alors je les remercie pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'ils ont bien voulu me consacrer.*

*À tous ceux qui m'ont aidé et encouragé de près ou de loin dans ce travail, avec leur patience, leurs compétences et leurs interventions appropriées aux niveaux technique, scientifique et éthique. Il me serait difficile de tous les nommer. Ils peuvent trouver ici une expression de ma gratitude.*

*À tous ceux dont les prières au fond de l'invisible nous soutiennent*

*À tous ceux qui ont eu le mérite de notre formation et de notre éducation*

## Table de matières

<b>Résumé</b>	<b>I</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>Objectif du travail</b>	<b>4</b>
<b>Travaux antécédants</b>	<b>6</b>
<b>1 Un aperçu sur le sable et son mouvement</b>	<b>8</b>
1.1 Introduction . . . . .	9
1.2 Les milieux granulaires . . . . .	9
1.2.1 Les grains en l'industrie . . . . .	11
1.2.2 Fraction volumique d'un empilement de grains . . . . .	12
1.3 Sable . . . . .	13
1.3.1 Définition . . . . .	13
1.3.2 Propriétés physiques du sable . . . . .	14
1.4 Histoire de graine voyageur . . . . .	15
1.4.1 Le cycle des grains . . . . .	15
1.5 Le Sable du point de vue de la physique . . . . .	18
1.5.1 Écoulement des granulaires secs sur plan incliné . . . . .	18
1.6 Le transport sédimentaire . . . . .	19
1.6.1 Types de transport . . . . .	20

---

1.6.2	Seuil de mise en mouvement . . . . .	22
1.6.3	Évolution du débit de grains . . . . .	23
1.7	Rhéologie . . . . .	24
1.7.1	Rhéologie des milieux granulaires . . . . .	24
1.7.2	Viscosité de cisaillement . . . . .	25
1.8	Tri granulométrique . . . . .	26
1.8.1	Définition . . . . .	26
1.9	Fractales . . . . .	27
1.9.1	Qu'est-ce qu'une géométrie fractale? . . . . .	27
1.9.1.1	Définitions . . . . .	27
1.9.1.2	Domaine d'application de la géométrie fractale . . . . .	28
1.9.2	La théorie des fractales . . . . .	29
1.9.3	Classification des fractales: . . . . .	29
1.9.3.1	Les fractales déterministes . . . . .	29
1.9.3.2	Fractales non déterministes . . . . .	30
1.9.4	Les caractéristiques des fractales . . . . .	30
1.9.5	Les courbes fractales : . . . . .	31
1.9.6	Dimension fractale : . . . . .	33
1.10	Conclusion . . . . .	35
<b>2</b>	<b>Partie expérimentale</b>	<b>39</b>
2.1	Introduction . . . . .	40
2.2	L'imagerie, une solution efficace . . . . .	40
2.2.1	Mesures par analyse d'image . . . . .	40
2.2.1.1	Capteur de vision ou analyseur de scène . . . . .	41
2.2.1.2	Numérisation de l'image . . . . .	41
2.2.1.3	Techniques d'analyse statistique de l'image . . . . .	42
2.2.2	Analyse statistique . . . . .	43
2.2.2.1	Histogramme . . . . .	43

---

2.3	Analyse texturale de l'image . . . . .	43
2.4	Description du dispositif . . . . .	44
2.4.1	Expérience de Granulométrie (gradient granulaire) . . . . .	44
2.4.2	Vue d'ensemble du systeme . . . . .	45
2.4.3	Conception du systeme . . . . .	47
2.4.3.1	Tas de sable . . . . .	47
2.4.3.2	Source de flux d'eau . . . . .	47
2.4.3.3	La camera . . . . .	48
2.5	Traitement d'images . . . . .	49
2.5.1	Logiciel PIVlab: . . . . .	50
2.6	Conclusion . . . . .	51
<b>3</b>	<b>Resultats et discussions</b>	<b>53</b>
3.1	Introduction . . . . .	54
3.2	Description initiale de tas de sable . . . . .	55
3.2.1	La pente d'équilibre . . . . .	55
3.2.1.1	L'impact d'une goutte d'eau sur une surface en grains de sable . . . . .	56
3.3	Visualisation générale . . . . .	56
3.4	Discussion . . . . .	57
3.4.1	Analyse macroscopique . . . . .	65
3.4.2	Analyse microscopique . . . . .	68
3.4.3	Mécanismes de cohésion entre grains en présence d'eau . . . . .	70
3.4.3.1	Les forces de Van der Waals . . . . .	70
3.4.3.2	Les forces électrostatiques . . . . .	72
3.4.3.3	Ponts liquides : forces capillaires . . . . .	72
3.4.3.4	Liaisons chimiques . . . . .	73
3.4.4	L'analyse granulométrique . . . . .	73
3.4.5	Formation de rides . . . . .	75

---

3.5 Conclusions . . . . .	76
<b>Conclusion générale</b>	<b>79</b>
<b>Perspectives</b>	<b>81</b>



## Liste de figures

1.1	Exemples de milieux granulaires et illustration des différentes interactions jouant un rôle en fonction de la taille d des particules [2]. . . . .	10
1.2	Pont liquide entre deux grains de même taille dans le cas de l'approximation torodale[11]. . . . .	15
1.3	le cycle géologique de sable.[13] . . . . .	16
1.4	le cycle des grains[13] . . . . .	17
1.5	Plateaua l'influence de l'eau et d'autres paramètres (tels que:le temps, ...) .	17
1.6	Mouvement du sable . . . . .	18
1.7	Photo d'un tas de billes de polystyrène. L'angle $\theta$ à la base du tas vaut ici $22,4^\circ$ [25] . . . . .	18
1.8	schéma présentant les différents modes de transport [16] . . . . .	21
1.9	Schéma des forces sur un empilement de 3 sphères identiques[9]. . . . .	23
1.10	Bilan des forces s'appliquant sur un grain du lit. et différents mode de transport[18] . . . . .	24
1.11	Benoît Mandelbrot at the EPFL, on the 14h of March 2007 . . . . .	27
1.12	Réseau fluvial auto-similaire de la province du Shaanxi en Chine. L'échelle est de 300 km de diamètre. Les couleurs représentent l'élévation.[21] . . . .	28
1.13	Ensemble de Cantor[25] . . . . .	30
1.14	Une fougère[22] . . . . .	30
1.15	les caractéristiques principales de base d'une fractale[20]. . . . .	31
1.16	initiateur et générateur[27] . . . . .	32

---

1.17	le tapis ou triangle de sierpinski[27]	33
1.18	Mesure de la dimension fractale de la côte de Grande-Bretagne[29]	34
1.19	courbe de Koch[30]	35
2.1	le schéma synoptique général d'une mémoire image	42
2.2	Exemple d'histogramme d'une image couleur. Une des premières[1]	43
2.3	Photos représentant les tamis utilisés dans l'expérience	45
2.4	Prise de vue des éléments du banc d'essai	46
2.5	interface PIVlab MALAB Online R2020b	51
3.1	avalanche de tas de sable	55
3.2	gouttes d'eau chutant sur du sable[4]	56
3.3	gouttes d'eau chutant sur du sable avec en plusieurs plans à différentes vitesses [4]	56
3.4	Une image que nous avons analysée	58
3.5	Importer l'invite d'image	58
3.6	Paire d'images analysées, région d'intérêt et masque d'image	59
3.7	Validation vectorielle	59
3.8	Paramètres dérivés: magnitude de la vitesse	60
3.9	Extraction de données le long d'une polyligne (composante de vitesse u)	60
3.10	Extraction de données le long d'une polyligne (composante de vitesse v)	61
3.11	Extraction de données le long d'une polyligne (magnitude de la vitesse)	61
3.12	Extraction de données le long d'une polyligne (Localisateur de vortex)	61
3.13	Extraction de données le long d'une polyligne (Vorticité)	62
3.14	Extraction de données le long d'une polyligne (magnitude de la vitesse)	62
3.15	Extraction de données le long d'une polyligne (Vorticité)	62
3.16	Extraction de données le long d'une polyligne (Localisateur de vortex)	63
3.17	u histogramme des composantes de vitesse	64
3.18	v histogramme des composantes de vitesse	64
3.19	histogramme de magnitude de la vitesse	65

---

3.20	Vue instantanée d'un cycle de repli de la couche extérieure d'un tas de sable	66
3.21	Profils instantanés de la couche extérieure d'un tas de sable en utilisant le programme de traitement d'image "image j" . . . . .	66
3.22	ripple-mark sur un sable humide . . . . .	67
3.23	L'analyse microscopique d'un silicate: Ce tétraèdre composé de 4 atomes d'oxygène et d'un petit atome de silicium en son centre est la brique élémentaire de tous les silicates (argiles et sables compris)[9] . . . . .	68
3.24	La structure atomique [3] . . . . .	69
3.25	vue microscopique de La face exposée au courant d'eau . . . . .	70
3.26	Pont liquide entre deux grains de même taille dans le cas de l'approximation toroïdale . . . . .	73
3.27	L'analyse granulométrique de La face sous le courant d'eau . . . . .	75

## Liste de table

2.1 les caractéristiques de la caméra GDV-800 HD . . . . .	48
--	----

---

## Nomenclature

- $\varphi$  : fraction solide
- $\rho$  : masse volumique de particule ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $\mu_{eff}$ : fraction effectif
- $\theta_\alpha$ : angle d'avalanche
- $\theta_r$ : angle de repose
- $F_m$ : la force motrice(N)
- $F$  : fonction du facture de forme de grains (N)
- $\tau$  : force de résistance (N)
- $\alpha$  : facteur concemant la forme de lite
- $\theta_t$ : nombre de shield
- $\tau^*$ : seuil de mise en mouvement
- $\epsilon_0$  : est la constante diélectrique du vide  $\epsilon_0 = 8,854.10^{-12}C^2J^{-1}m^{-1}$
- $\epsilon_r$  : la permittivité relative du milieu
- $h$  : la constante de Planck  $h=6,626070*10^{-34}J.S$
- $K_B$ : la constante de Boltzmann (J/K)
- $T$  : la température thermodynamique (en K)
- $r$  : la distance moyenne entre les molécules considérées (m)
- $\mu_1$ et $\mu_2$ : les moments dipolaires des molécules considérées
- $V_1$ et $V_2$ : les fréquences électroniques d'ionisation (en Hz)
- $\alpha_1$ et $\alpha_2$  : les polarisabilités électroniques( $C.m^2.V^{-1}$ )

- 
- $\varepsilon_r$  : la permittivité relative de l'eau  $\varepsilon_r = 80$
  - $q_1$  et  $q_2$  : charges électrique coulomb
  - $F_{capillaires}$ : forces capillaires (N)
  - $\Delta p$  : la différence de pression entre l'air et le pont liquide (Pa)
  - $g$  : Accélération de la pesanteur ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

---

“Auguries of innocence”

To see a World in a grain of sand And a Heaven in a wild flower, Hold Infinity in the palm of your hand And Eternity in an hour.

(Voir un Monde dans un grain de sable Et un Paradis dans une fleur sauvage, Tenir l’Infini dans la paume de sa main Et l’Eternité dans une heure.)

William Blake

# Introduction générale



---

La dynamique des milieux granulaires fait aujourd'hui l'objet de recherches très actives, à la fois numériques, expérimentales et théoriques ; en dépit des difficultés rencontrées, et même si la perspective d'une théorie générale reste éloignée, de nets progrès ont été réalisés . La complexité de l'étude du sable (comme des autres milieux granulaires) réside sur le fait qu'il est composé d'un grand nombre des particules reliées par des interactions complexes ce qui implique que son comportement n'est pas le même selon le mode suivant lequel on le sollicite. Par exemple un tas de sable statique sur une table va se comporter comme un solide (sans mouvement malgré la présence de contraintes de cisaillement) , le sable, comme dans un sablier par exemple va couler comme un liquide (ou presque) ; et enfin, si l'on secoue énergiquement un tas de sable, le milieu devient très agité avec des particules bougeant dans tous les sens et interagissant par collisions. Dans ce régime que l'on appelle collisionnel le milieu ressemble à un gaz de plus le comportement du sable dépend de nombreux paramétrés autres que le mode de sollicitation. On compte parmi eux, la composition du sable qui n'est pas toujours homogène, de la forme des grains qui le compose (polydispersité), de l'humidité . Ajoutons à cela d'autres paramétrés comme les forces électrostatiques qui peuvent influencer l'interaction entre les particules et la cohésion du milieu .

Ce travail est une contribution à la compréhension de la dynamique des écoulements granulaires à travers l' étude des rides formée par un écoulement d'eau cisailant un lit de sable ,de haut en bas , dans le problème qui nous intéresse, le transport des grains de sable ,le paramètre le plus important est la cohésion qui caractérise a quel point un grain est lie aux autres. Ce travail se focalise en priorité sur la phase d'observation de l'environnement mais ne néglige pas la réflexion sur les processus de fonctionnement ainsi, en liaison avec cette double approche, deux questions fondamentales ont guidé le déroulement des travaux et la rédaction de ce mémoire .

**comment poursuivre précisément l'impact d'un flux d'eau sur un lit de sable ?**

---

**comment décrire clairement un phénomène aussi complexe ?** La compréhension d'un tel phénomène peut se résumer en 5 étapes clés .

- 1) observation de l'impact eau -sable au temps (T)
- 2) observation de l'écoulement d'eau sur le lit de sable au temps(T+1)
- 3) description des évolutions entre (T)et (T+1).
- 4) explication des phénomènes à l'origine des évolutions.
- 5)prédiction des évolutions futures du milieu.

# Objectif du travail

---

Le transport de grains de sable entraînés par un fluide en écoulement fait partie de notre quotidien, étant fréquemment rencontré dans la nature et dans l'industrie. Pour bien comprendre le transport d'une couche de grains de sable par charriage, il nous faut connaître l'écoulement au voisinage de la couche mobile, puisque c'est lui le moteur du transport. Ainsi, la théorie décrivant les écoulements turbulents proches d'une paroi granulaire trouve ici toute son importance.

Le présent travail se présente sous la forme d'une série d'expériences qui mettent en valeur des phénomènes variés que l'on rencontre dans le mouvement de grains de sable. L'itinéraire de découverte proposé passe en revue les principes de base du comportement de sable qui jouent un rôle important dans les mécanismes de cohésion. Dans un premier temps, on décrit les constituants du sable et leur origine au travers d'une (histoire) géologique des grains (histoire de grains voyageurs). Puis de manipulation, on découvre les différentes spécificités de grains de sable au cours de leurs mouvements à travers les expériences qui sont commentées par la suite.

Des ensembles de grains de sable de tailles différentes se séparent spontanément lorsqu'ils sont mis en mouvement : c'est ce qu'on appelle la ségrégation. Le tas de sable présente une pente régulière, appelé l'angle de repos. Cet angle est l'expression des forces de frottement qui jouent un rôle non négligeable dans la tenue d'un mur en terre. Il structure de nombreux paysages dans la nature.

Le présent travail concerne les milieux granulaires humides. Pour comprendre les mécanismes de cohésion d'un mur en terre, il faut commencer par redécouvrir les liquides et en particulier les forces capillaires qui jouent un rôle prépondérant dans la cohésion. Ce sont ces forces qui font tenir les châteaux de sable. À mesure que la taille des grains diminue, ces forces grandissent. La série d'expériences suivante montre en un ensemble les autres rapports particuliers que la matière en grains entretient avec les liquides.

# Travaux antécédants

---

Ayant effectué des longs séjours en Libye au cours de sa carrière militaire (jusqu'à 1935), mobilisé ensuite au nord l'Afrique au cours de la Deuxième Guerre, il a fait des longues observations sur le transport de sable et sur la dynamique des dunes dans les déserts. Installé à l'Impérial College de Londres, et ensuite à l' U.S. Geological Survey , il a mené aussi des nombreux travaux expérimentaux (Charru(2007)). Parmi ses publications, *The physics of blown sand and desert dunes* (Bagnold(1941)) est devenue l'une des plus importantes références sur le transport de grain . Dans ce livre, Bagnold fait une description du transport de sable, notamment par saltation, de la rétro-action du sable en mouvement sur l'écoulement d'air , de la formation de dunes, de leur morphologie et de leur déplacement .

Depuis la publication de ce livre, notre connaissance sur le transport de grains n'a pas énormément progressée et Bagnold(1941) demeure une œuvre actuelle .

D'autres travaux pionniers s'ajoutent à ceux de Bagnold, dont Du Boys (1879) , Shields (1936), Meyer-Peter et Mueller (1948), Einstein(1943), Einstein(1950) et Rouse(1937) sont quelques exemples, Du Boys (1879) a peut-être été le précurseur du développement des formules de transport de grains par charriage , ayant été le premier à utiliser le concept d'excès de taux de cisaillement pour déterminer le débit de charriés par un fluide .

La contribution de Shields la plus connue est peut-être la définition d'un critère de mise en mouvement de grains soumis à un fluide en écoulement . Rouse s'intéresse au transport par suspension et développe une solution , largement utilisée, pour la concentration de l'écoulement en particules solides . Quant à Meyer-peter et Mueller , leur contribution la plus connue est leur formule pour quantifier le débit de grains charriés par l'écoulement .

Les travaux de H.A.Einstein (Einstein(1942) et Einstein (1950)), fils du prix Nobel A.Einstein, portent sur le développement d'une approche probabiliste pour décrire le mouvement de grains par charriage .

# **Chapitre 1**

Un aperçu sur le sable et son  
mouvement

## 1.1 Introduction

De l'atome jusqu'aux plus lointaines galaxies, les grains sont à la base de notre monde. Ils sont omniprésents dans notre univers quotidien sous toutes les formes: sable, graviers, cailloux, roches, oranges, noix, pommes, riz, blé, maïs, poivre, sel, farines, fumées, poudres pharmaceutique, etc...

Les grains, sous toutes leurs formes, constituent un intérêt économique et humain gigantesque. Pourtant, bien qu'universellement répandus dans la nature et dans de nombreux domaines de l'activité humaine, la méconnaissance du comportement des milieux granulaires a persisté jusqu'à une époque récente. Au cours des quinze dernières années, la physique des matériaux granulaires a moissonné d'observation expérimentale et de résultats de simulations numériques. De concepts nouveaux et de modèles théoriques. Des équipes de chercheurs d'origines thématiques variées se sont rapidement mobilisées face au véritable défi scientifique que pose la compréhension du comportement de la matière en grains.

Une meilleure connaissance de ce transport est donc nécessaire pour la compréhension de certains phénomènes naturels ainsi que pour la maîtrise des procédés mettant en œuvre des grains.

## 1.2 Les milieux granulaires

Les milieux granulaires, comme le sable, sont une collection de granulats de tailles caractéristiques (diamètre  $D$  du grain) supérieures à 100 micromètres (voir Brown and Richards (1970)) où les interactions entre les grains sont essentiellement celles de contact. À des échelles plus petites, les poudres et les colloïdes sont des milieux dont le diamètre des grains est respectivement compris dans l'intervalle  $[1\mu m; 100\mu m]$  et  $[1\text{nm}, 1\mu m]$ . Dans le cas des poudres, les interactions de van der Waals ne sont plus négligeables, tandis que dans le cas des colloïdes, l'agitation thermique joue un rôle important (figure 1.1). Dans cette mémoire, on appellera "milieu granulaire sec" un milieu granulaire dans lequel l'interaction des grains avec le fluide environnant est négligeable (comme par exemple



dans le cas d'un écoulement de sable dans l'air si le vent n'est pas trop fort). Entre ces deux extrêmes, il existe les "milieux granulaires humides" qui sont composés, en plus de granules, de deux fluides non miscibles. Le milieu est alors plus cohésif grâce à la présence de réseaux de ponts capillaires (par exemple les châteaux de sables sont construits avec un mélange d'eau et d'air). Quand un milieu granulaire est complètement immergé dans un fluide et que celui-ci a une influence sur le comportement du milieu granulaire qui ne peut plus être négligée, on parlera de "milieu granulaire mouillé" (par exemple dans le transport de sédiment sous-marin)[8].

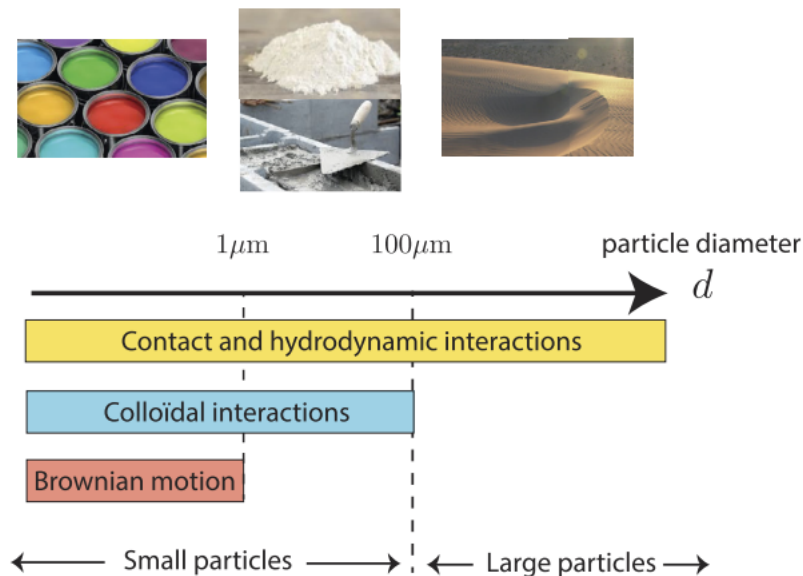


Figure 1.1: Exemples de milieux granulaires et illustration des différentes interactions jouant un rôle en fonction de la taille  $d$  des particules [2].

Les milieux granulaires sont caractérisés par deux choses: la portée des interactions internes mises en jeu, et leur comportement par rapport à la matière fluide et la matière solide. Pour la première caractéristique, les milieux granulaires existent sur des échelles allant du mésoscopique (quelques poillèmes de millimètres) jusqu'aux macroscopiques (puisque des systèmes, comme les anneaux de Saturne, se comportent aussi, collectivement, comme des matériaux granulaires!), en passant par les échelles intermédiaires. Pour la deuxième caractéristique, les milieux granulaires, de par leurs comportements collectifs, ne se comportent ni comme des assemblages solides, ni comme des milieux continus

fluides: bien que constitués d'éléments solides (les grains solides), les interactions entre ces éléments au sein des milieux granulaires sont des mécanismes collectifs; la compréhension détaillée de ces mécanismes font encore l'objet de recherches fondamentales, et l'enjeu est qu'elle permet de maîtriser les techniques de mise en œuvre des structures matérielles et aussi de comprendre et de prévenir les dysfonctionnements et accidents, parfois dramatiques, liés à ces structures (avalanches, explosions, effondrements, glissements de terrain, dispersion de nuages pulvérulents...)[4].

Nous savons qu'un milieu granulaire peut se comporter à la manière d'un liquide, les différentes couches de grains glissant alors les unes par rapport aux autres. Cela n'est cependant possible que si les interactions entre grains sont faibles et que la compacité (c'est-à-dire le rapport entre le volume des grains et le volume total) n'est pas trop élevé. Dans le cas du sable de marée basse, le mouvement de va-et-vient de l'eau à marée descendante déplace les grains, ce qui finit par compacter fortement le sable mouillé. Les grains sont alors tellement proches qu'ils ne peuvent bouger qu'en s'écartant les uns des autres lorsqu'on cherche à déformer l'empilement : ce dernier se dilate alors, d'où le nom donné à ce phénomène. Comme le volume des grains eux-mêmes est invariable, c'est celui des interstices qui augmente : l'eau est donc aspirée sous la surface pressante, ce qui assèche la zone adjacente[9].

### 1.2.1 Les grains en l'industrie

Le " tas de sable " est un nom commode pour désigner les matériaux granulaires. Chaque fois que l'on entasse plusieurs centaines de milliers d'objets et que les interactions entre ces objets sont semblables à celles qui existent entre des blocs durs, on a affaire à un matériau granulaire. Autrement dit, un matériau granulaire est un matériau formé de grains (de taille supérieure à  $100\mu m$ ), ces derniers étant des " parties élémentaires discernables de l'ensemble " (Encyclopédie Universalis). Généralement, ces grains sont arrangés de manière désordonnée et présentent souvent des différences de forme, de taille et d'état de surface[9].

Ainsi, cette définition permet de regrouper sous une même appellation " granulaire " des substances très diverses et d'échelles très différentes telles que des fines poudres compactées composant les cachets d'aspirine, en passant par les ballasts des voies ferrées, les dunes du désert ou même les anneaux de Saturne

Les milieux granulaires ont une place très importante dans de nombreux secteurs de l'activité humaine. On les rencontre en génie civil (ballasts des voies ferrées, sables, ciments, bétons, routes, digues,...), et mécanique des sols et des roches (glissements de terrains, avalanches, mouvements de dunes, minerais,...), mais aussi dans l'industrie pharmaceutique, cosmétique et chimique (poudres de lessives, engrais,...), dans le secteur agroalimentaire (céréales, farines, blé, sucre, riz,...), et même dans l'industrie spatiale (remplissage des propulseurs d'Ariane 5)

Près de 70% de la matière que manipulent les industriels est sous forme granulaire. Le problème de leur transport, stockage, mélange, séparation, conditionnement ou transformation se pose donc aux industries qui cherchent à satisfaire certains objectifs : sécurités d'ouvrages, performances, coûts... [9]

### 1.2.2 Fraction volumique d'un empilement de grains

Un paramètre important caractérise un empilement de grains en général : il s'agit de la fraction volumique solide  $\varphi$ . La fraction volumique solide  $\varphi$  est le rapport entre le volume des grains (par exemple, nombre de grains multiplié par le volume d'un grain si les grains sont identiques) et le volume occupé par l'empilement (volume du récipient, du tas de sable, etc.) La fraction volumique influe énormément sur la rhéologie du fluide ; sa connaissance pour la prédiction de l'écoulement est donc cruciale. La fraction volumique  $\varphi$  dépend de la disposition des grains, et par conséquent de la manière dont l'empilement a été fabriqué. Suivant la disposition des grains, l'empilement est plus ou moins dense, et donc la fraction volumique  $\varphi$  est plus ou moins élevée. En soumettant l'empilement à des sollicitations, on peut faire évoluer la configuration des grains d'un état à un autre [25].

## 1.3 Sable

Le sable peut être considéré comme matériau constitutif d'un ensemble parmi d'autres éléments. C'est ainsi qu'il peut être mélangé avec du ciment pour constituer des matériaux de construction. Il peut être chauffé pour servir de moyen de cuisson ou mouillé pour le stabiliser ou s'en servir pour des constructions éphémères de jeux d'enfants. Dans le Sahara, après une pluie, les enfants construisent des cases en utilisant leurs pieds comme moule. Ils construisent la case au-dessus de leurs pieds et en les retirant, ils libèrent l'intérieur et la porte de la construction. D'autre part, le sable peut interagir avec les éléments avec lesquels il est en contact tout en restant bien identifié. C'est ainsi qu'il réagit avec l'air et l'eau en état statique ou quand il est transporté mais il a aussi une action sur les éléments qu'il rencontre par l'intermédiaire de l'érosion. Cependant la manifestation la plus remarquable de l'interaction du sable avec son milieu est le phénomène d'ensablement quand il se dépose et entoure ou ensevelit les objets ou infrastructures qu'il rencontre sur son chemin. Dans la suite de ce texte, nous allons présenter quelques aspects de ce matériau sable avec un regard de physicien. Il s'agira d'une présentation multi-échelle (dans le sens où les phénomènes physiques peuvent être impliqués au niveau de la taille du grain de sable, à la taille d'un amas de sable ou à celle d'un champ dunaire) plus axée sur le comportement et la dynamique permettant le transport de ce matériau et la formation d'objets présentant une morphologie particulière (les dunes). Du point de vue du physicien, le sable entre dans la catégorie des « milieux divisés », dits « matière molle » ou des « milieux granulaires ». Dans ce sens, il partagera des caractéristiques avec par exemple des tas de grains de céréales, de billes de verre ou des cailloux de ballast[11].

### 1.3.1 Définition

Le sable fait partie de la famille des milieux granulaires. On nomme milieux granulaires tous les milieux composés d'une collection de particules macroscopiques de taille supérieure à quelques dizaines de  $\mu m$ . Cette limite inférieure s'explique par les types d'interactions existant entre les grains. Dans le cadre du transport sédimentaire, on définit le sable par

un intervalle de taille (qui dépend de  $\rho_{sable}$  (masse volumique de la particule)). La taille minimale est définie par la taille en dessous de laquelle la vitesse de chute du grain est inférieure aux fluctuations de vitesse de l'écoulement, et la taille supérieure par la taille au dessus de laquelle il n'y a plus de mouvements que ce soit directement du au l'eau ou même par impact. Ce qui nous donne un diamètre de grain de quelques dizaines de micromètres au millimètre[8].

### 1.3.2 Propriétés physiques du sable

Les matériaux granulaires comme le sable, notamment lorsqu'ils sont secs, présentent des propriétés physiques tout à fait particulières. Des propriétés qui se situent à mi-chemin entre celles des fluides et celles des solides. Ainsi, par exemple, le sable épouse-t-il parfaitement la forme du récipient dans lequel on va le verser, tout comme le ferait l'eau. En revanche, il peut s'écouler par avalanches successives si la pente dépasse un angle de 30 degrés[9].

#### **-Comment l'eau permet de "coller" les grains de sable ?**

Lorsqu'on humidifie légèrement le sable, il est rendu possible comme dit précédemment de construire des châteaux de sables. En effet l'eau fait intervenir l'adhésion capillaire qui permet de garder deux corps solidaire l'un envers l'autre par l'intermédiaire d'un fin film de liquide. Quelques exemples concrets qui sont expliqués par ce phénomène ; les cheveux collés en sortant de la douche, et surtout la cohésion entre les grains de sable. L'eau forme alors un pont capillaire faisant intervenir un autre phénomène appelé la pression de Laplace. La pression de Laplace est vérifiée avec l'équation où  $\gamma$  est la tension de surface entre le liquide et le solide. L'interface entre le liquide et le grain est courbée avec un rayon de courbure  $-R$ . En effet, la courbure est tournée vers l'extérieur, elle est donc négative. Il y a donc une pression atmosphérique plus faible dans le liquide qui joint les deux grains, cette différence de pression engendre une attraction des deux grains[10].

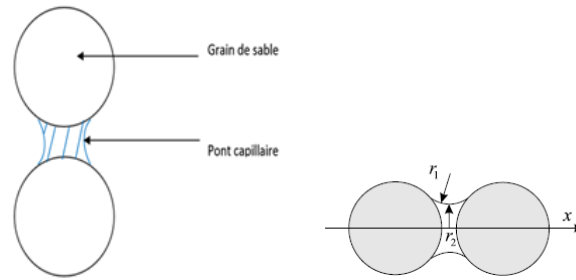


Figure 1.2: Pont liquide entre deux grains de même taille dans le cas de l'approximation torodale[11].

## 1.4 Histoire de graine voyageur

### 1.4.1 Le cycle des grains

le sable, les limons, les argiles proviennent des roches. Cette vision des choses est toutefois insuffisante. Les roches ne sont pas seulement l'origine des grains. Elles sont aussi leur destinée : les grains, après un long voyage, reforment une roche. Par exemple, les grains de sables, en s'agglomérant, peuvent former du grès. De même, les argiles peuvent former une roche appelée l'argilite, les silts peuvent former la siltite et les graviers peuvent former des conglomérats. On appelle diagenèse l'ensemble des phénomènes par lequel ces grains (sédiments) reforment une roche (roches sédimentaires). Ainsi, sable et autres grains sont éphémères, ils ne constituent qu'un état transitoire de la matière minérale. Ils font partie d'un grand cycle de transformation qui se répète inlassablement.

Ce cycle comprend 4 grandes étapes :

- L'altération
- Le transport
- Le dépôt
- La diagenèse

L'altération, est la destruction des roches par désagrégation physique et décomposition chimique, voire biologique. Elle donne naissance à une grande variété de produits : sols, débris rocheux, ions en solution. Le transport est le déplacement de ces produits vers les zones de dépôts. Dans ces zones, les sédiments, en s'enfonçant plus profondément dans la terre à mesure que de nouvelles couches de sédiments les recouvrent, reforment des roches par un ensemble de processus appelé la diagenèse[12].

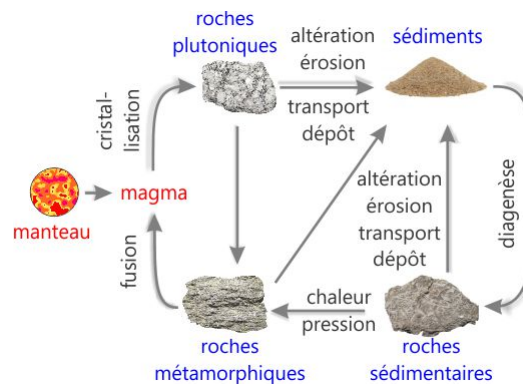


Figure 1.3: le cycle géologique de sable.[13]



écroulement de débris d'un schiste (roche microgélive), Belgique .L'altération



écroulement de débris concentré dans un vallon; Piau Engaly, Pyrénées, France. Le transport



Scour marks, plage de Vildé-la-Marine, Baie du Mont-Saint-Michel, France. Le dépôt



Cimentation partielle d'un sable avec formation de "miches" de grès (flèches). Falaise du Cap Gris Nez, France. La diagenèse

Figure 1.4: le cycle des grains[13]



Figure 1.5: Plateaux l'influence de l'eau et d'autres paramètres (tels que:le temps, ...)



## 1.5 Le Sable du point de vue de la physique

Le sable joue un rôle économique, environnemental et culturel important dans la vie des habitants des zones désertiques. Cette matière s'intégrant parfois dans la composition de matériaux utiles, à la construction par exemple, peut présenter par son mouvement ou son accumulation des désagréments, . Cela se traduit par une gêne personnelle lors des tempêtes de sable ou par des problèmes d'érosion plus globaux et plus contraignants du point de vue du développement de ces régions[11].



Figure 1.6: Mouvement du sable

### 1.5.1 Écoulement des granulaires secs sur plan incliné

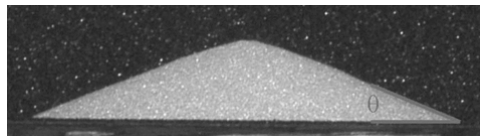
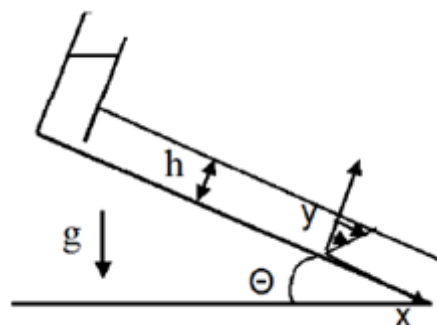


Figure 1.7: Photo d'un tas de billes de polystyrène. L'angle  $\theta$  à la base du tas vaut ici  $22,4^\circ$ [25]



Une inclinaison dans les expériences sur plan incliné (écoulement stationnaire et uniforme) revient à imposer un coefficient de friction effectif dans toute la couche :  $\mu_{eff} = \tan \theta$ .

Coulomb a décrit le phénomène d'avalanche d'un tas de sable. Au de là d'un angle d'avalanche  $\theta_a$ , les grains se mettent en mouvement et pour un angle légèrement plus faible, appelé angle de repos  $\theta_r$ , l'avalanche arrête. On peut alors définir les coefficients de friction macroscopique interne statique  $\mu_s$  et dynamique  $\mu_d$ :  $\mu_s = \tan \theta_a$  et  $\mu_d = \tan \theta_r$ .

Il est à noter qu'un coefficient de friction constant est incompatible avec les équations régissant la dynamique de l'écoulement. Ce ci montre les limites de cette approche.

Sur le plan incliné, l'écoulement commence pour un angle  $\theta_{start}(h)$  et s'arrête pour un angle d'inclinaison  $\theta_{stop}(h)$ . Ces deux angles dépendent de la hauteur de la couche. Plus celle-ci est mince et plus il faut incliner le plan pour faire s'écouler les grains. Une couche fine résiste donc plus aux contraintes qu'une couche épaisse.. L'écoulement de type "tas de sable" correspond au cas limite des grandes hauteurs[8].

## 1.6 Le transport sédimentaire

Notre étude se concentre sur le transport granulaire par un fluide, phénomène présent aussi bien dans les milieux naturels que dans certains problèmes industriels. La compréhension du transport de particules par un fluide peut donc permettre une meilleure optimisation de certains processus ou au contraire une limitation de ceux-ci si tel en est l'objectif. Dans le domaine environnemental, l'étude du transport de sédiment est crucial pour la compréhension de phénomènes naturels tel que l'érosion ou le charriage dans les cours d'eau, les évolutions de la morphodynamique des plages ou encore les écoulements pyroclastiques (écoulements de lave par exemple). De plus, le transport granulaire par un fluide est souvent accompagné de l'apparition de structures comme des rides ou des dunes. On peut retrouver ces structures dans les déserts ou les rivières par exemple, avec des échelles de longueur et de temps qui peuvent être très différentes, du millimètre à plusieurs kilomètres pour la longueur et de quelques seconde à plusieurs années pour le temps. Ces structures peuvent parfois apparaître dans certains procédés industriels et sont

souvent indésirables. À noter que ces motifs apparaissant à la surface du lit granulaire sont universels et se retrouvent, par exemple, à la surface de Mars . Leur compréhension est primordiale tant le transport granulaire et ces structures peuvent avoir un impact sur l'activité humaine avec par exemple l'ensablement des ports ou l'avancée du désert[15].

### 1.6.1 Types de transport

Il existe plusieurs modes de transport de sédiment dans un écoulement .Ces modes de transports sont caractérisés par des dynamiques différentes , fonction de la taille des grains, de leur densité ainsi que de l'hydrodynamique de l'écoulement . On distingue trois dynamiques de transport différentes:

Le charriage (appelé roulement sur la figure ci-dessous ): les grains charriés sont les grains que sont déplacés par l'écoulement tout en restant la plupart du temps en contact avec le lit. Le poids du grain est prépondérant dans le transport par charriage Le charriage est associé aux grains les plus gros et saltation

- La saltation :les grains se déplacent par sauts contrairement aux grains charriés, ils ne roulent donc pas en restant en contact avec le lit, bien que le poids reste important dans la dynamique de saltation
- La suspension : les grains en suspension dans l'écoulement sont transportés sur de longues distances sans contact avec le lit . Dans cette dynamique ,les forces hydrodynamiques sont prépondérantes devant le poids propre du certaine mesure .
- la saltation :le transport par suspension n'est pas comme dans une zone proche du lit .La suspension est associée aux grains de petite taille et peu lourds

La figure ci-dessous illustre ces différentes dynamiques de transport.Sur cette figure , le terme charriage désigne l'ensemble du transport par saltation et par roulement

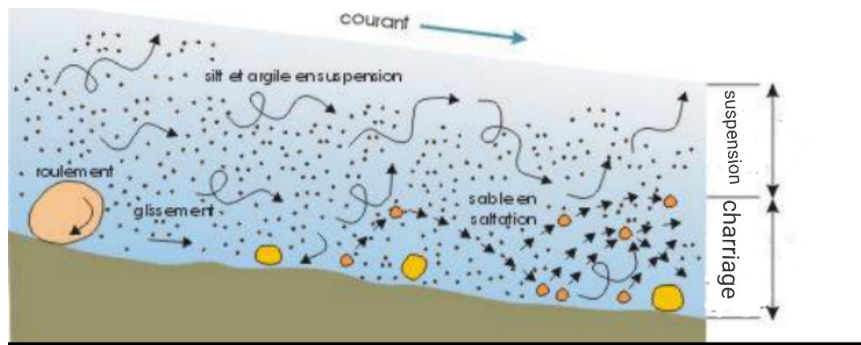


Figure 1.8: schéma présentant les différents modes de transport [16]

La terminologie utilisée sur la figure 1.8 associe la saltation au charriage (roulement) en une notion plus large de charriage. De fait, de nombreux modèles de transport modélisent le transport par cette définition large du charriage incluant la saltation. Tout au long de ce projet, on s'intéressera uniquement au transport sous cette définition large du charriage, incluant la saltation.[17].

Le transport sédimentaire peut se caractériser principalement par trois types de mouvement de particules, la suspension, la saltation et le roulement/glisement, aussi appelé charriage (voir figure 1.8). Cette classification du transport sédimentaire en ces différentes catégories dépend des forces dominantes de la dynamique. Le premier type défini, la suspension, apparaît lorsque les forces hydrodynamiques, c'est-à-dire les forces appliquées par le fluide environnant sur les particules, sont prédominantes. Dans cette configuration, les grains sont transportés par l'écoulement et ont relativement peu d'interaction entre eux. Leur concentration est généralement dans une gamme typique de 0.1% à 10%. Ensuite, lorsque la force de gravité devient un peu plus importante devant les forces hydrodynamiques apparaît le phénomène de saltation. Selon, le grain est soulevé par son contact avec un grain et décollé du lit grâce à la force de portance avant de finir par retomber par gravité. Dans ce cas, les mouvements typiques observés sont des mouvements de type balistique. La particule décolle du lit de grains d'une hauteur de quelques diamètres de grains par une impulsion et sur une longueur d'environ plusieurs dizaines de diamètres, toujours selon. Enfin, lorsque la force de gravité est encore plus importante devant les forces hydrodynamiques, on parle alors de charriage par roulement ou glissement des grains. Les particules sont alors en contact

permanent avec le lit et roulent ou glissent sur les grains voisins. À noter que dans les écoulements naturels, souvent complexes, les trois types de transport coexistent du fait de la polydispersité des grains présents et de la variété de densité. Néanmoins, dans le cadre de notre étude, nous nous limiterons au cas du mode de transport par charriage par la gamme de vitesse d'écoulement étudiée et un rapport de densité entre les particules et le fluide[15].

### 1.6.2 Seuil de mise en mouvement

Le transport par charriage est un phénomène à seuil : il existe une valeur critique du cisaillement du fluide sur le lit capable de déloger et déplacer un grain. La détermination de cette valeur critique, fondamentale pour bien comprendre le charriage, a été le sujet de nombreuses études, mais il n'y a pas encore un vrai consensus sur cette valeur ni sur les méthodes pour la déterminer.

Le seuil de mise en mouvement (threshold, en anglais) d'une particule sur un lit de grains est atteint quand les effet liés aux forces motrices (dues 'a l'écoulement du fluide) égalisent les effets liés aux forces de résistance (dues au poids de la particule). Basé sur cela, Shields (1936) a proposé un critère de mise en mouvement d'une particule par une approche dimensionnelle. Il propose que la force motrice principale est la trainée

$$F_m = \tau d^2 f \quad (1.1)$$

où  $f$  est une fonction du facteur de forme de grains,  $\tau = \rho u^2$ , Quant à la force de résistance, il propose qu'elle est liée à la pesanteur :

$$F_R = \alpha(\rho_p - \rho)gd^3 \quad (1.2)$$

où  $\alpha$  est un facteur concernant la forme du lit et le coefficient de frottement. Considérant un lit plat et constitué de particules uniformes, et utilisant la contrainte seuil de mise en mouvement de grains  $\tau_t$ , on peut former le nombre de Shields critique  $\theta_t$ [3]:

$$\theta_t = \frac{\tau_t}{(\rho_p - \rho)gd} \quad (1.3)$$

Pour appréhender la signification du nombre de Shields, la figure 1.9. montre le bilan que l'on peut faire à l'échelle d'un grain, ou les différentes forces qui s'appliquent sur un grain reposant sur 2 autres sont représentées (force hydrodynamique, poids apparent, réactions)[9].

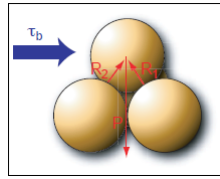


Figure 1.9: Schéma des forces sur un empilement de 3 sphères identiques[9].

Le seuil de mise en mouvement des particules, le Shields critique, augmente avec la pente. Pour un même écoulement, les particules fines sont en suspension alors que les gros grains sont charriés. Par la suite, nous ne nous intéresserons qu'au phénomène de transport le plus morphogène, c'est-à-dire le charriage.

Sont couramment admis les seuils de contrainte suivants:

$\tau^* < 0.027$  : Pas de mouvement

$0.027 < \tau^* < 0.047$ : Mouvements légers, non assimilables à du transport solide

$0.047 < \tau^* < 0.25$ : Transport solide par charriage

$0.25 < \tau^*$  : Transport solide par suspension[13].

### 1.6.3 Évolution du débit de grains

Évolution du débit de grains au delà du seuil, le débit volumique granulaire est la grandeur principalement utilisée pour caractériser le transport sédimentaire. Il existe de nombreux modèles, empiriques, semi-empiriques ou même analytiques, qui expriment ce débit de grains en fonction du nombre de Shields  $\theta_t$ . L'évolution du débit granulaire a beaucoup été étudié dans le cas d'un écoulement permanent turbulent mais il existe aussi des études dans le cas d'un écoulement laminaire [15].

Les études antérieures sur le transport solide se sont concentrées principalement sur la quantification du taux de transport, sur l'influence des paramètres hydrauliques, ou encore sur l'étude du transport à l'échelle des grains (Meyer-Peter et Müller, 1948 Freyet Martin, 2012; Ashmore, 1988). De plus, la prédiction et l'étude du transport solide sont complexes, faisant intervenir de nombreux paramètres (dont le tri granulométrique fait partie). Ainsi, afin de limiter le nombre de facteurs influents, ce seuil de mise en mouvement dépend, entre autres, de la taille des grains et on peut définir différentes contraintes en fonction du diamètre  $D_i$  de la particule ; il s'agit de contraintes par classes. [18]

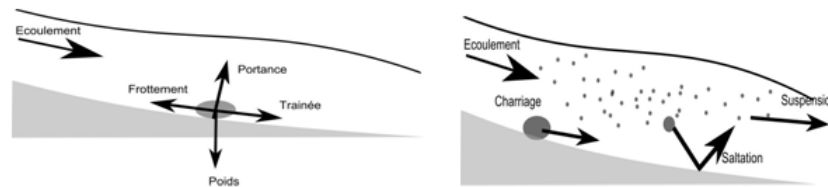


Figure 1.10: Bilan des forces s'appliquant sur un grain du lit. Et différents mode de transport [18].

## 1.7 Rhéologie

La rhéologie vient du mot grec 'rheo' qui veut dire couler et 'logos' qui signifie étude.

Le concept 'rhéologie' a été introduit en 1929 par Eugène Cook Bingham, lorsque la société américaine de rhéologie a été créée. C'est la science qui étudie les déformations et écoulement de la matière, (sous l'effet d'une contrainte appliquée). Elle est apparue pour palier l'impuissance de matériaux intermédiaires entre solide et liquide [19].

### 1.7.1 Rhéologie des milieux granulaires

Nous définirons les milieux granulaires comme des suspensions et des charriage et saltation concentrées de particules composées uniquement d'une phase liquide et solide. On parle souvent également de boue ("slurry" en anglais) pour de tels systèmes [Herminghaus, 2005, Mitarai and Nori, 2006]. Les granulaires mouillés regroupent plus généralement des suspensions dont une des phases est liquide. Il peut s'agir donc de systèmes biophysiques

(par exemples eau-billes) ou triphasiques (par exemple eau-billes-air). Dans les systèmes triphasiques, la présence de bulles d'air peut modifier grandement les propriétés rhéologiques du milieu par l'intermédiaire des forces capillaires qui interviennent en son sein. Ainsi, ce sont ces forces cohésives qui permettent la construction de châteaux de sable [14].

### 1.7.2 Viscosité de cisaillement

En 1687, quelques années après les expériences de Hooke<sup>1</sup>, Issac Newton exprime intuitivement dans ses *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*<sup>2</sup> l'idée de viscosité pour un liquide visqueux : la contrainte appliquée est proportionnelle au gradient de vitesse, et le coefficient de proportionnalité est la viscosité<sup>3</sup>. L'équation correspondante s'écrit :  $\sigma = \eta \dot{\gamma}$

où  $\sigma$  est la contrainte de cisaillement (mesurée en Pa dans le Système International (SI) de mesure),  $\dot{\gamma}$  le gradient de vitesse dans l'épaisseur du fluide (mesuré en  $s^{-1}$ ), et  $\eta$  la viscosité dynamique (mesurée en Pa.s). L'unité de la viscosité dynamique est parfois appelée Poiseuille (1 Poiseuille = 1 Pa.s = 1 kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>). Dans le système CGS (centimètre, gramme, seconde), la viscosité dynamique s'exprime en Poise (1 Poise = 0,1 Poiseuille = 0,1 Pa.s)[4].

---

<sup>1</sup>En accrochant des masses à l'extrémité d'un ressort vertical, Robert Hooke suggère que la force appliquée  $f$  est proportionnelle à l'allongement du ressort  $\Delta L$  :  $f \propto \Delta L$ .

<sup>2</sup>Principes mathématiques de la philosophie naturelle

<sup>3</sup>Newton formule l'hypothèse suivante [Newton, 1687] : « La résistance qui vient du défaut de lubricité des parties d'un fluide doit être, toutes choses égales, proportionnelle à la vitesse avec laquelle les parties de ce fluide peuvent être séparées les unes des autres ». La « résistance » est la viscosité, c'est-à-dire la réaction à la contrainte appliquée, et la « vitesse avec laquelle les parties de ce fluide peuvent être séparées les unes des autres » est le gradient de vitesse. Le « défaut de lubricité » des couches de fluides, c'est-à-dire le glissement imparfait des couches entre elles, provient des échanges de quantité de mouvement entre les différentes couches du fluide. Le mot « lubricité » est à prendre ici dans le sens de « lubrification »...



## 1.8 Tri granulométrique

### 1.8.1 Définition

Le terme de tri granulométrique se rencontre plus généralement dans un milieu granulaire poly-disperse. Ce terme regroupe l'ensemble des phénomènes qui conduisent à des dynamiques différentes selon la taille des grains. Les sédiments grossiers et les sédiments fins n'ont pas les mêmes comportements, les mêmes trajectoires. [18]

le physicien considère en général un milieu composé par des grains sphériques , le tas de sable, pour ne pas évoquer des structures plus complexes telles que les rides ou les dunes, reste un objet complexe à appréhender. l'érosion d'un lit granulaire commençait par la formation de rivières fractales.

## 1.9 Fractales

La fin des années soixante-dix a vu se développer la notion de géométrie fractale dans de nombreux domaines de la physique. Le concept de géométrie fractale, introduit par B.B. Mandelbrot, fournit en effet un cadre solide pour l'analyse des phénomènes naturels dans divers secteurs des sciences. Roger Pynn écrit dans la revue *Nature* que « si cette opinion continue à s'étendre, nous n'aurons pas longtemps à attendre avant que l'étude des fractales devienne une partie obligatoire du cursus universitaire » (Frankhauser, 2002). La notion de fractale regroupe dans un cadre géométrique unique de nombreux travaux mathématiques antérieurs. Les objets concernés ont été inventés dès la fin du XIXe siècle par des mathématiciens comme Cantor, Peano, Le terme "fractal" a été introduit par B.B. Mandelbrot, fractal veut dire qui a été fractionné à l'infini[20].



Figure 1.11: Benoît Mandelbrot at the EPFL, on the 14h of March 2007

### 1.9.1 Qu'est-ce qu'une géométrie fractale?

#### 1.9.1.1 Définitions

” Entre le domaine du désordre incontrôlé et l'ordre excessif d'Euclide, il y a désormais une nouvelle zone d'ordre fractal ”(Mandelbrot)<sup>4</sup>

**Fractal** : ” Fractal, e, als adjectif, (latin fractus, brisé) ” .Se dit d'objets mathématiques dont la création où la forme ne trouve ses règles que dans l'irrégularité ou la fragmentation, et des branches des mathématiques qui étudient de tels objets:Objet fractal. Géométrie

---

<sup>4</sup>Mathématicien français pionnier de l'utilisation de l'informatique pour la visualisation et l'expérimentation des mathématiques, il est le premier à avoir mis en avant la notion d'objet fractal, qu'il a popularisée dans des livres.

fractale. La nature offre de nombreux exemples de formes présentant un caractère fractal : flocons de neige, ramifications des branches et bronchioles, des réseaux hydrographiques, etc.....<sup>5</sup>[20].

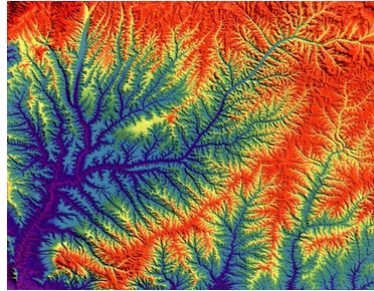


Figure 1.12: Réseau fluvial auto-similaire de la province du Shaanxi en Chine. L'échelle est de 300 km de diamètre. Les couleurs représentent l'élévation.[21]

### 1.9.1.2 Domaine d'application de la géométrie fractale

La géométrie fractale permet de caractériser des objets ayant une forme très irrégulière, et qui ont la propriété d'invariance par un changement d'échelle. La géométrie fractale a trouvé son application dans de nombreux domaines variés, nous pouvons citer : les mathématiques, la mécanique des fluides, la biologie, la chimie. Elle a permis de modéliser des expériences aléatoires complexes, d'où une utilisation en finance, pour modéliser les variations des cours boursiers, Mantzaraset et al ont appliqués les fractales à l'étude des mouvements chaotiques et turbulents, pour les prévisions météorologiques, Penn et al ont utilisées la dimension fractale pour caractériser les images de radiologie médicale. Les informaticiens n'ont pas été les derniers à utiliser la géométrie fractale dans certains domaines comme la compression de l'information, la mesure de la longueur et l'étude de la forme des côtes[22, 23].

L'approximation des objets naturels par des formes fractales constitue un important centre d'intérêt pour la recherche, Guérin et al ont proposé une méthode basée sur un modèle fractal afin de modéliser des formes de contours irréguliers, cette méthode a permis de résoudre le problème de l'approximation des courbes.

On rencontre également dans l'analyse de texture des images. Et pour finir, sans

---

<sup>5</sup>Dictionnaire Larousse

pour autant être exhaustif, la géométrie fractale a été aussi utilisée dans la segmentation d'images et dans la reconnaissance de formes[22, 23] .

## 1.9.2 La théorie des fractales

### Historique

De nombreuses notions mathématiques ont d'abord été considérées comme des “monstres mathématiques”, avant d'être domestiquées, offrant alors de nouvelles perspectives et de nombreuses découvertes. Il en a été ainsi chez les pythagoriciens avec l'apparition des nombres irrationnels, à la Renaissance avec celle des nombres négatifs et des nombres complexes, et au XIXème siècle avec l'exigence de rigueur de plus en plus poussée qui remit en cause beaucoup d'énoncés admis jusque là sans démonstration.

Les objets fractals, eux aussi, ont pendant longtemps été considérés comme des monstres, et le sont encore parfois aujourd'hui. De 1875 à 1925, l'idée se répandit que les mathématiciens comme Cantor, Peano, Von Koch, Hausdorff étaient faiseurs d'objets pathologiques : ils créaient des objets que la nature ne connaissait pas, remettant en question la géométrie euclidienne et les notions de fonction et de dimension.

Un exemple de monstre est l'existence mathématique de courbes continues ayant de nombreux points sans dérivée. Ces monstres ne trouvèrent alors ni théorie ni application

## 1.9.3 Classification des fractales

Les fractales sont définies de façon récursive ou itérative selon la manière avec laquelle elles sont construites. Nous pouvons distinguer deux grandes catégories : les fractales déterministes et les fractals non déterministes.

### 1.9.3.1 Les fractales déterministes

Ce sont des figures géométriques de structure complexe dont la création ou la forme met en jeu des règles utilisant le fractionnement.

Prenons l'exemple de l'ensemble de Cantor qui est un exemple de systèmes itérés[24]. Nous pouvons le construire en partant d'un segment dont nous enlèverons le tiers centrale , ensuite dans chacun des tiers restants , nous enlèverons son propre tiers central, et ainsi de suite jusqu'à l'infinie (Figure 1.13).



Figure 1.13: Ensemble de Cantor[25]

### 1.9.3.2 Fractales non déterministes

Contrairement aux fractales déterministes, il existe des fractales liées au hasard ou à des phénomènes aléatoires.[26, 24]

C'est le cas des objets fractales naturels tels que les nuages, les montagnes, les choux fleurs, les fougères (Figure 1.14).

On rencontre également dans cette catégorie les ensembles fractals aléatoires qui peuvent être construits par simulation en introduisant des composantes aléatoires dans procédure [22].



Figure 1.14: Une fougère[22]

### 1.9.4 Les caractéristiques des fractales

La géométrie fractale se base sur " La répétition d'un principe d'emboîtement d'échelles "(Frankhauser, 2003). Une fractale est caractérisée par :

### a. L'initiateur ou figure initiale (L)

Est la forme de la structure de base. Il s'agit en général d'un objet géométrique euclidien (un carré, un cercle,...). L'initiateur joue un rôle mineur dans la géométrie fractale.

Il représente la partie euclidienne dans un objet fractal. Il exprime si un objet ressemble plu tôt à un carré ou à un cercle ou à une autre forme euclidienne. Il est lié au paramètre "facteur de forme ".

### b. Le générateur

La règle de répétition qui génère le système spatial hiérarchique est désignée comme le générateur de la fractale. Il définit de quelle manière on passe d'une échelle à la suivante et contient l'information sur les paramètres qui caractérisent le principe d'emboîtement.

### c. L'itération

La fractale est générée en appliquant la règle de répétition de façon itérative, en passant par différentes étapes d'itération. À chaque étape, la structure générée est constituée de répliques de la figure initiale qui s'appellent les éléments ou éléments occupés (N) de la structure. L'ensemble de ces éléments occupés est désigné comme la masse occupée d'une fractale à une étape d'itération donnée[20].

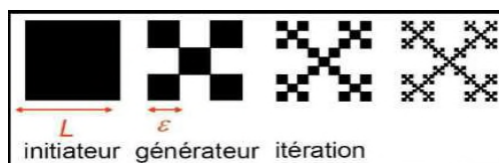


Figure 1.15: les caractéristiques principales de base d'une fractale[20].

## 1.9.5 Les courbes fractales

Les courbes fractales sont les fractales les plus simples à se représenter. Elles sont obtenues grâce à une construction géométrique.

Ici encore, il en existe plusieurs sorte : Les premières sont celle obtenue grâce à un initiateur et à un générateur.

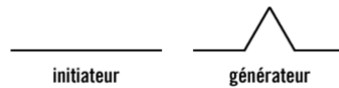
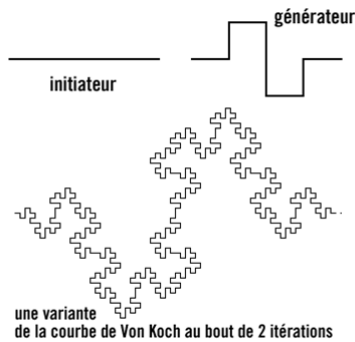


Figure 1.16: initiateur et générateur[27]

La plus connu des courbes de ce genre est le flocon ou courbe de Von Koch ; c'est à cette courbe que correspondent les figures 1.16. Pour construire cette courbe, on débute avec un initiateur puis on remplace chaque segment de la figure (au départ il n'y en a qu'un) par le générateur. Une étape de la construction va être appelée "itération", puisque l'on répète la même opération un certain nombre de fois. La courbe de Von Koch la plus connue est construite de la manière suivante :



Mais de nombreuses variations existent, en voici un exemple :



Théoriquement, pour obtenir la fractale, il faudrait recommencer faire une infinité d'itération lors de sa construction. Mais dans la réalité, on ne peut même pas afficher (la limite étant la résolution des ordinateurs) les détails obtenus après la cinquième ou sixième itération.

Mais il existe une infinité de manière différente de créer des courbes fractales : L'un des exemples le plus connu est le triangle de Sierpiński ci dessous. Il est obtenu avec au départ, un triangle équilatéral noir. Dans ce triangle, on évide un triangle équilatéral dont les

sommets sont les milieux des arrêtes du premier triangle. Ceci nous donne trois triangles noirs équilatéraux plus petits avec lesquels on recommence le même processus[27].



Figure 1.17: le tapis ou triangle de sierpinski[27]

### 1.9.6 Dimension fractale

La géométrie euclidienne ne permet pas de traiter des structures complexes. La dimension euclidienne d'un objet est le nombre de paramètres indépendants (coordonnées) requis pour une description de l'objet. De même la dimension topologique ne permet pas de décrire le degré de complexité de la structure. La dimension topologique d'un ensemble  $E$  est égale à  $n$  si on a besoin d'un ensemble  $F$ , dont la dimension est  $D_T(F) = n - 1$ , pour séparer cet ensemble  $E$  en deux parties du même type. La dimension topologique de structures géométriques constituées d'un ensemble de points, de courbes ou d'éléments de surfaces est donc égale à 0, 1 ou 2 respectivement. Des mathématiciens comme Peano et Cantor ont présenté des objets pathologiques pour lesquels les mesures conventionnelles ne s'appliquaient pas. Des contradictions telles que les courbes (de dimension topologique égale à 1) remplissant un espace (de dimension topologique égale à 2) ont provoqué une polémique quant à la notion de dimension.

Les objets fractals ne possédant pas d'échelle de longueur caractéristique (ils possèdent les mêmes détails à toute échelle), les méthodes de mesures classiques ne peuvent pas s'appliquer. La géométrie fractale introduit un concept de dimension associée à un exposant, non entier en général, et qui reflète le degré d'occupation d'une structure dans l'espace métrique où elle est placée.

De manière générale, la longueur d'une courbe irrégulière ne peut être calculée car plus l'unité de mesure est petite, plus la longueur sera élevée (on dit dans ce cas que



la courbe est non-rectifiable). La longueur dépend donc de l'échelle de mesure. Pour mesurer le degré d'irrégularité, on évalue l'augmentation d'une longueur, d'une surface ou d'un volume, mesuré à des échelles de plus en plus petites. On considère alors ces deux paramètres, longueur, surface ou volume -  $y$  - en fonction de l'échelle -  $x$  - sont reliés par une loi de puissance,  $y=x^d$  où  $d$  est la dimension fractale[28].

En géométrie fractale, la dimension fractale,  $D$ , est une grandeur qui a vocation à traduire la façon qu'a un ensemble fractal de remplir l'espace, à toutes les échelles. Dans le cas des fractales, elle est non entière et supérieure à la dimension topologique. Ce terme est un terme générique qui recouvre plusieurs définitions. Chacune peut donner des résultats différents selon l'ensemble considéré, il est donc essentiel de mentionner la définition utilisée lorsqu'on valorise la dimension fractale d'un ensemble. Les définitions les plus importantes sont la dimension de Hausdorff, la dimension de Minkowski-Bouligand (ou "box-counting"), et la dimension de corrélation. Dans le cas d'ensembles fractals simples (auto-similarité stricte, notamment) on conjecture que ces définitions donnent des résultats identiques



Figure 1.18: Mesure de la dimension fractale de la côte de Grande-Bretagne[29]

Or, par exemple, la longueur de la courbe de Koch est multipliée par 4 lorsque sa taille triple (En effet, cette courbe est précisément définie comme étant constituée de quatre copies d'elle-même, trois fois plus petites). Puisque  $4 \approx 3^{1.26}$ , on peut considérer intuitivement qu'il s'agit d'un objet de dimension  $D \approx 1.26$  (plus précisément,  $D \approx \frac{\log(4)}{\log(3)}$ ). Il ne s'agit plus d'une simple courbe unidimensionnelle, ni d'une surface, elle se situe "entre les deux". Cette "dimension fractale", non entière, est caractéristique des ensembles fractals.

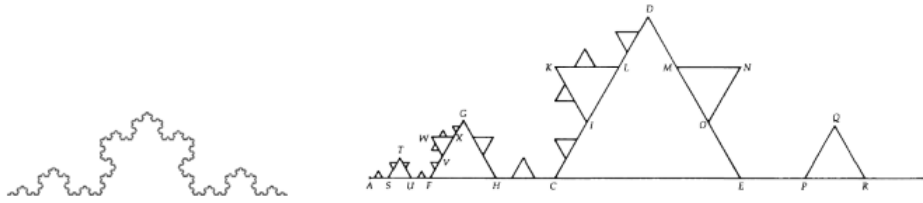


Figure 1.19: courbe de Koch[30]

## 1.10 Conclusion

La matière en grains est universellement répandue, pourtant, bien qu'extrêmement commune, elle recèle un grand nombre de phénomènes physiques sur inconnus du grand public. En ce sens, elle est un thème de vulgarisation scientifique et d'enseignement particulièrement adéquat.

# Bibliographie

- [1] M. Edouard IZARD Thèse doctorat de l'université de toulouse " MODELISATION NUMERIQUE DES ECOULEMENTS GRANULAIRES DENSES IMMERGES DANS UN FLUIDE" 14 octobre 2014
- [2] Forterre, Yoël; Pouliquen, Olivier. Physics of particulate flows: From sand avalanche to active suspensions in plants. *Comptes Rendus Physique*, 2018, 19.5: 271-284
- [3] De Moraes Franklin, Erick. Dynamique de dunes isolées dans un écoulement cisailé .PhD Thesis. Université de Toulouse ,Université Toulouse III -Paul Sabatier2008.
- [4] Frédéric, Élie .Tas de sable et parabole Une introduction à la physique des milieux granulaires, juillet 2014
- [5] Fourrière, Antoine. Morphodynamique des rivières: Sélection de la largeur, rides et dunes. PhD Thesis 2009.
- [6] Nicolas, Huang. Rhéologie des pâtes granulaires .université paris 6 pierre et marie curie. physique des liquides ,Thèse de doctorat ,22 septembre 2006
- [7] El-Moctar, Ahmed Ould. Le sable du point de vue de la physique. *Techniques & Culture. Revue semestrielle d'anthropologie des techniques*, 2013, no 61, p. 28-41.
- [8] Pons, Adeline. LE SABLE ET LE VENT. 2007.
- [9] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/geologie-sable-6009/2-3-2020>

- 
- [10] <http://lechateaudesabletpe.e-monsite.com/pages/le-sable-et-la-physique.html>
- [11] Soulié, Fabien. Cohésion par capillarité et comportement mécanique de milieux granulaires. Thèse de doctorat. Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc. 2005.
- [12] Anger, Romain; FONTAINE, Laetitia; HOUBEN, Hugo. Grains de bâtisseurs. 2011.
- [13] Boulvain, Frédéric. Pétrologie sédimentaire: des roches aux processus. Ellipses, 2010.
- [14] Izard, Edouard. Modélisation numérique des écoulements granulaires denses immergés dans un fluide. 2014.
- [15] Bouteloup, Joris. Simulation numérique de la dynamique d'un lit granulaire cisailé par un fluide visqueux. 2017.
- [16] <http://mdevmd.accesmad.org/mediatek/mod/page/view.php?id=11364>
- [17] [http://these.univ-lyon2.fr/documents/getpart.php?id=lyon2.2008.pintomartins\\_d&part=154405](http://these.univ-lyon2.fr/documents/getpart.php?id=lyon2.2008.pintomartins_d&part=154405)
- [18] Leduc, Pauline. Etude expérimentale de la dynamique sédimentaire des rivières en tresses. 2013.
- [19] Hania ,B et Imane ,B L'effet du comportement rhéologique du fluide sur quelque caractéristique hydrodynamiques d'un lit fluidisé solide-liquide mémoire de fin de cycle MASTER -université de Béjaïia.2016
- [20] Ameer, Lydia, OUACHOUR, Hadjira, MANSOURI, Ahmed, et al. Application de l'analyse fractale à l'étude morphologique des tissus urbains de la ville de Bejaïa. Mémoire de master. Université abderrahmane mira.2018.
- [21] Courtesy Bruce D. Malamud, Kings College London.

- 
- [22] S.Ben Moussa ,A.M.Alimi,"l'utilisation de la géométrie fractale pour la discrimination des mots ",université de Sfax , Tunisia,18-21mars 2004
- [23] Oulhadj, Zaira et Boucedra, Yamina. Analyse de texture d'image IRM par L'approche fractale. Mémoire de master.2015.
- [24] Medjdoub, Faiza. Caractérisation des tissus mammaires par l'approche fractale. mémoire de master. 2014.
- [25] Kyriacos, Soula; DE PHARMACIE, Facult. Philosophiae Doctor (Ph. D.) en Sciences Pharmaceutiques.
- [26] Lehamel, Malha. Segmentation d'images texturées à partir des attributs fractals. mémoire de magister. Université Mouloud Mammeri. 2011.
- [27] Le Mailloux et Duchesne et al "TPE LES FRACTALES" 2003
- [28] Kyriacos, S. Reseaux vasculaires: Analyse fractale et modelisation de la croissance (French and English text). 2000
- [29] Own work by Avsa taken from (left to right): • Image:Britain-fractal-coastline-200km.png • Image:Britain-fractal-coastline-100km.png • Image:Britain-fractal-coastline-50km.png
- [30] Eglash, Ron. African fractals: Modern computing and indigenous design. Rutgers University Press, 1999.

# Chapitre 2

## Partie experimentale

Afin de valider expérimentalement les fractales décrite précédemment dans une configuration réaliste, la méthode développée a systématiquement été mise en œuvre dans une configuration test. C'est une configuration simple mais représentative de configurations plus complexes (annulation du gradient de vitesse du milieu extérieur, présence de parois). Toute la partie expérimentale se consacre à l'étude d'un écoulement de grains de sable en forme d'amas soumis à un flux d'eau sur cette configuration. Les caractéristiques dynamiques ainsi que le comportement associé aux grains de sable en mouvement sont extrait et illustré grâce à une technique de traitement d'images d'une part et d'autre part comparé avec des résultats de référence.

## 2.1 Introduction

Dans l'optique d'analyser le processus de réfraction de la lumière, l'imagerie et des techniques de traitement d'images sont associées afin d'extraire les paramètres pertinents influençant la modification d'image. Les progrès dans le domaine de l'imagerie et la diminution du coût des systèmes ont rendus ces systèmes beaucoup plus attractifs. La qualité du traitement d'images dépend fortement de la qualité des images acquises. La conception du système d'acquisition est donc une étape importante.

Le travail de ce chapitre consiste en la mise en place d'un système d'imagerie qui permet la visualisation du comportement des grains de sable répondant aux conditions de flux d'eau le long de la surface en forme d'un amas. Les caractéristiques dynamiques ainsi que le comportement associé aux grains de sable en mouvement sont extraits grâce à une technique de traitement d'images.

## 2.2 L'imagerie, une solution efficace

Les progrès dans le domaine de l'imagerie ont été très importants ces dernières années. Ce progrès presque quotidien a également permis une radicale diminution du coût des appareils, ce qui les a rendus beaucoup plus attractifs. Récemment, des recherches s'appuyant sur l'imagerie ont été entreprises pour caractériser des flux de particules solides.

### 2.2.1 Mesures par analyse d'image

Le traitement d'images trouve des applications dans beaucoup de domaines. Il s'applique notamment dans le domaine de la productique, de la mesure et l'interprétation, la surveillance et la sécurité, l'audiovisuel. Quel que soit le domaine d'application, il est nécessaire de connaître ce que l'on cherche à traiter dans l'image. L'analyse du contenu d'une image a pour objet de rassembler dans une même présentation les différentes techniques permettant de caractériser l'information que comporte l'image.

Le signal image peut être analysé soit à partir de sa représentation sous la forme du signal vidéo, soit à partir de sa représentation visuelle, c'est-à-dire sous la forme d'un tableau de données à deux dimensions. Cependant, le signal vidéo analogique n'est plus aujourd'hui utilisé que pour la restitution de l'image sur un visuel. Tous les traitements et les transmissions d'images se font essentiellement sous forme numérique. L'analyse du contenu d'une image s'effectue donc sur les données du tableau à deux dimensions qui la représente.

### 2.2.1.1 Capteur de vision ou analyseur de scène

Une image correspond à la projection nette d'une scène sur un plan. Cette projection nette est assurée par un objectif composé de plusieurs lentilles. Le plan sur lequel l'image de la scène est projetée est un capteur d'intensité de lumière qui comporte une charge électrique proportionnelle à l'intensité lumineuse en chaque point de sa surface. Ce capteur est appelé rétine. Le contenu de cette rétine est analysé à l'aide de circuits électroniques pour délivrer un signal vidéo. L'ensemble rétine- objectif constitue, avec les circuits électroniques de formation du signal vidéo, une caméra.

### 2.2.1.2 Numérisation de l'image

Le signal vidéo se présente comme un codage de l'image. La structure de ce codage est liée au mode de restitution de l'image sur l'écran d'un visuel cathodique ou solide [11]. S'il s'agit d'images « télévisuelles », ces images sont visualisées avec un rythme de renouvellement compatible avec une vision saccadée des mouvements. Le rythme physiologique minimum est voisin de 25 images par seconde. C'est la raison pour laquelle, en Europe, le rythme minimum de renouvellement d'une image a été choisi égal à 25 images par seconde, ce qui correspond à une durée de 40 ms par image (la plus longue au monde), valeur de deux périodes du secteur. La matière luminescente de l'écran est suffisamment rémanente pour garder en mémoire, pendant la durée d'un balayage, l'information " imprimée " par le spot.

L'image ou la séquence d'images sont destinées à être traitées par un calculateur,



## 2.2. L'IMAGERIE, UNE SOLUTION EFFICACE

qui peut être un micro-ordinateur. Pour permettre le traitement, il faut pratiquer une opération de numérisation des images. La numérisation consiste à échantillonner le signal vidéo de chaque ligne de façon à établir une relation biunivoque entre le numéro (n) de chaque échantillon et les coordonnées (x,y) du point correspondant sur l'image.

Une image numérisée est stockée dans une mémoire adressable à lecture et à écriture à triple accès. La montre le schéma synoptique général d'une mémoire image. Ce système comprend trois fonctions fondamentales : une fonction acquisition, une fonction visualisation du contenu du plan mémoire, une fonction traitement d'image accomplie directement dans la mémoire par un processeur de traitement. Ce processeur de traitement peut être un micro-ordinateur.

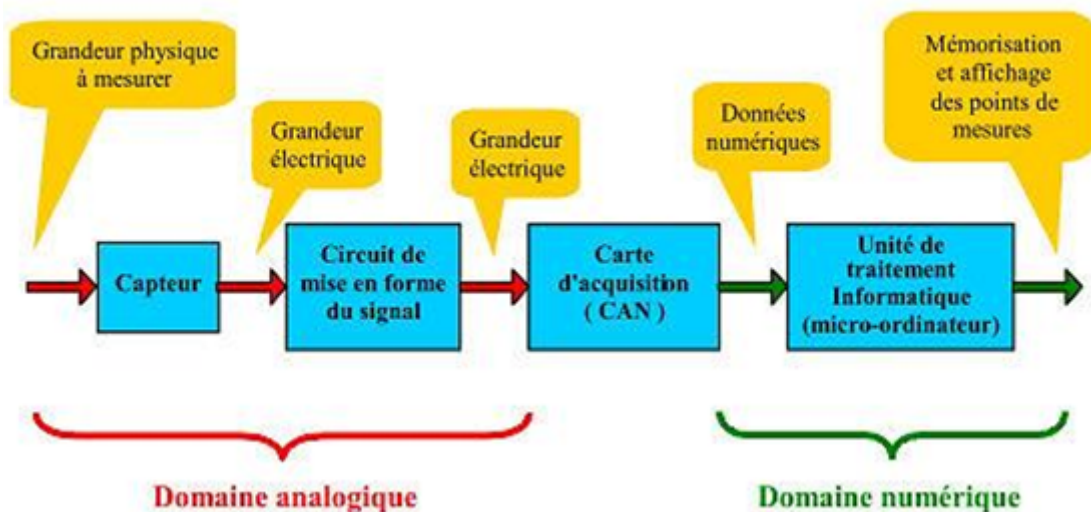


Figure 2.1: le schéma synoptique général d'une mémoire image

### 2.2.1.3 Techniques d'analyse statistique de l'image

Dans la plupart des applications de traitement des images, il est nécessaire de bien connaître les caractéristiques et la nature des informations contenues dans le signal 2D qui la représentent. Cette connaissance nécessite de pratiquer une analyse de son contenu. Cette analyse peut être statistique, analytique, spectrale, informationnelle, structurelle, multirésolution, psycho-émotive...

## 2.2.2 Analyse statistique

### 2.2.2.1 Histogramme

Dans le cadre de l'analyse statistique de l'image, étant donné le nombre élevé de pixels qu'elle contient, le niveau de gris des pixels peut être considéré comme une variable aléatoire. Cette variable aléatoire peut même être supposée stationnaire et ergodique.

La première caractéristique statistique d'une image est la détermination de son histogramme. Il représente le dénombrement des fréquences, ou la densité de probabilité d'apparition  $p(g)$  des niveaux de gris ( $g$ ) dans une image. Le graphe de l'évolution de la fréquence des niveaux de gris en fonction du niveau de gris est appelé histogramme de l'image.

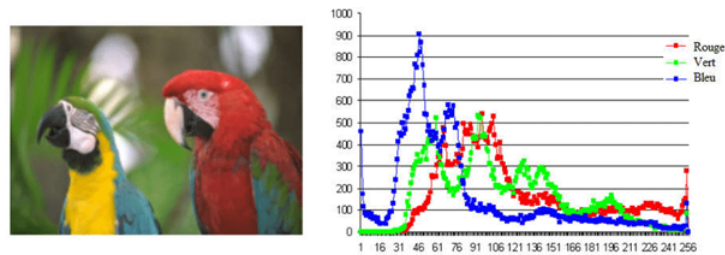


Figure 2.2: Exemple d'histogramme d'une image couleur. Une des premières[1]

À partir de l'histogramme, un certain nombre de caractéristiques statistiques peuvent être calculées : la moyenne, la variance et l'écart-type, la matrice de corrélation, les moments d'ordres supérieurs. Ces grandeurs sont généralement calculées pour déterminer les caractéristiques locales ou par zone dans les images. Ces caractéristiques locales servent, dans différentes applications, à connaître la nature de la zone pour choisir le type de traitement le mieux adapté.

## 2.3 Analyse textuelle de l'image

Les méthodes d'analyse textuelle ont pour objectif la détermination de caractéristiques d'arrangement et de propriétés spatiales des différents éléments fondamentaux d'une image. L'analyse de textures est l'une des méthodes les plus utilisées en analyse d'images.

## 2.4. DESCRIPTION DU DISPOSITIF

---

Elle possède un large domaine d'applications notamment en classification et en segmentation d'objets.

Une texture peut être considérée comme une répétition de motifs typiques. Dans ce cas, on applique une approche statistique au second ordre pour déterminer la dépendance spatiale des niveaux de gris. On peut aussi appliquer une approche structurelle pour étudier la nature des motifs élémentaires constitutifs de l'image[2].

## 2.4 Description du dispositif

### 2.4.1 Expérience de Granulométrie (gradient granulaire)

#### But de l'essai

Les grains de sable n'ayant pas tous la même dimension. On réalise l'analyse granulométrique d'un sable pour déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant le sable. Cette analyse permet de représenter la répartition en poids des différents éléments contenus dans celui-ci suivant leur dimension.

#### Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

#### expérimental

Le matériel nécessaire est constitué de tamis circulaires dont le maillage métallique définit des trous carrés de dimensions normalisées. Dans le meilleur des cas, on utilise une machine à tamiser électrique qui imprime un mouvement vibratoire à la colonne de tamis (figure2.3). Dans notre cas le mouvement vibratoire a été effectué à la main. La dimension

## 2.4. DESCRIPTION DU DISPOSITIF

---

nominale des tamis est donnée par l'ouverture de la maille, c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture carrée. Ces dimensions sont telles qu'elles se suivent dans une progression géométrique de raison 10, depuis le tamis 0.08 mm jusqu'au tamis 80 mm. Un tamis est désigné par un numéro de module correspondant à la taille de sa maille[11].

### Les étapes de l'expérience

- Nous pesons un échantillon de sable
- Nous préparons un ensemble de tamis de sable tridimensionnels (0.08a 0.5)
- Nous filtrons l'échantillon, Avec un groupe de tamis à la main
- Nous pesons la quantité de sable restant de chaque tamis, Et nous l'avons mis dans un tableau pour calculer le pourcentage



Figure 2.3: Photos représentant les tamis utilisés dans l'expérience

### 2.4.2 Vue d'ensemble du systeme

Le principe du système d'acquisition est illustré dans la figure 2.4

## 2.4. DESCRIPTION DU DISPOSITIF



Figure 2.4: Prise de vue des éléments du banc d'essai

Le système se compose de :

- Camera :une camera GDV-800 HD
- Éclairage:l'utilisation du rayonnement du soleil .
- Ordinateur : d'analyser le film de l'expérience
- Buret : c'est la source de flux d'eau

Ainsi le présent montage permet, par l'observation de mouvement des graines de sable , de localiser les régions où varie le gradient de vitesse et de connaitre dans quel sens s'effectue

## 2.4. DESCRIPTION DU DISPOSITIF

---

la variation. La méthode n'est utilisable que si la variation du gradient de vitesse est rapide, ce qui est le cas pour notre étude.

Un examen visuel direct de l'image qui vient d'apparaître sur l'écran de system de scène peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des hétérogénéités locales et superficielles développées sur le plan de surface d'amas. Toutefois, l'examen purement visuel présente des limitations de différentes natures qui justifient l'écllosion de toute une gamme de procédés de contrôle optique, dont, parmi les principaux la visualisation automatique par traitement d'images. D'où la nécessité d'une camera télécommandable à distance et un TV.

La conception d'un système d'imagerie, implique un travail précis concernant l'éclairage de la scène. En effet, cela conditionne la qualité de l'enregistrement des images et par conséquent la complexité du traitement d'images qui est appliqué à posteriori. Un puissant dispositif d'éclairage est indispensable à cause des paramètres intrinsèques de la camera qui prennent des valeurs bien spécifiques dans le cas de l'imagerie (haute fréquence d'acquisition, faible temps d'exposition). En effet, un faible temps d'exposition implique qu'une faible quantité de lumière passe rège la scène, ce qui a pour conséquence l'acquisition d'une image sombre qui ne pourra pas être traité correctement.

### 2.4.3 Conception du systeme

#### 2.4.3.1 Tas de sable

Un tas de sable au repos a une structure conique d'angle à la base  $\theta$  imposée par des propriétés de dynamique et de statique des milieux granulaires. On cherche à déterminer  $\theta$ . Chemin faisant, on est amené à s'intéresser à la dynamique des milieux granulaires et aux conditions d'équilibre des pentes.

#### 2.4.3.2 Source de flux d'eau

L'eau est verser par la burette sur la surface du tas de sable avec un débit continu et spécifique le long de durée d'expérience

## 2.4. DESCRIPTION DU DISPOSITIF

## 2.4.3.3 La camera

Afin de permettre le suivi de l'afflux des grains de sable se déplaçant à de telle vitesse, la camera doit offrir une fréquence d'acquisition adéquate. Nous avons opté pour une camera GDV-800 HD (High Definition Digital Video Camcorder). Ce type de camera présente des caractéristiques suffisantes à notre étude (Tableau 1). Cette camera offre une résolution maximale de 3200x2400 (8M Pixels). Le capteur CMOS est composé de photosites de dimensions 12x12 mm , ce qui constitue une taille relativement importante par rapport à la normale. Cela permet de capter plus de lumière pour un pixel et réduire la sensibilité au bruit. En résolution maximale, la fréquence d'acquisition peut atteindre 60 images par seconde. Enfin, une dernière caractéristique également très importante dans le domaine de l'imagerie est le temps d'exposition du capteur. Celui-ci représente l'intervalle de temps pendant lequel l'obturateur laisse passer la lumière recueillie par le capteur afin de procéder à la construction d'une image.

Paramètre de camera	Caractéristique de paramètre
Image Sensor	8MP max .Interpolated Resolution
Lens	F=6.8-34mm ; F3.5-3.7
Focus Range Macro	1-80cm Normal ; 10 cm-infinite
Zoom HD(1080p)	1X-10X (5X Optical + 2X Digital)
LCD	monitor 2.5 " TFT LCD
Storage Media	Built-in 128MB Memory ,SDHC Card Slot support
Image Resolution High	3200X2400 (8M Pixels)
STD	2592X1944 (5M Pixels)
Low	2048X1536 (3M Pixels)
Movie Resolution HD	(1080 p) 1440X1080 (30fps)
HD	(720 p) 1280 X 720 (30fps)
WVGA	848 X 480 (60fps)
VGA	640 X 480 (30fps)
File Format Picture	JPEG, Movie :Mov (H.264)
Battery	NP60 Lithium-ion Rechargeable Battery

Table 2.1: les caractéristiques de la caméra GDV-800 HD

Un paramètre important à fixer est le champ de vue. Il correspond aux dimensions réelles de la scène qui est reflétée sur l'écran.

### A. Determination du champ de vue

Afin de permettre le suivi le plus aisé possible, la zone d'étude doit représenter la plus grande partie possible du capteur. Cependant, un second paramètre important à prendre en compte est la vitesse maximale des grains de sable (m/s). Sachant que la camera est capable de fonctionner en pleine résolution à 30 images/s, une graine de sable peut parcourir 0,5 mm entre l'acquisition de 2 images. Ainsi, le champ de vue vertical doit être supérieur ou égal à 2.8mm afin d'obtenir au moins 2 images d'une même graine de sable possédant une telle vitesse. Le champ de vue fixe, il reste maintenant à déterminer le système optique permettant d'obtenir une représentation nette d'un tel champ de vue.

### B. Positionnement et mise au point de la camera

Une bonne visualisation ainsi que des mesures précises nécessitent un positionnement soigneux et minutieux de la camera, et la possibilité d'ajuster ces coordonnées à tout moment. Pour répondre à ce besoin, la camera et la source lumineuse sont portées sur le même rail afin de les préserver toujours orthogonal à la scène. Le rail permet de translater de manière linéaire la camera vers la zone d'intérêt. Le positionnement vertical est assuré au moyen de deux ascenseurs métriques de précision, sur lesquels est fixe le rail. Un déphasage en hauteur entre la camera et la source de lumière est exigent pour éviter l'ombre de la camera. Le réglage du diaphragme de la camera est réalisé de manière à obtenir un bon contraste entre la prise de vue de la zone d'intérêt et le bruit de fond, nécessaire pour optimiser le produit de corrélation.

## 2.5 Traitement d'images

Le traitement d'images associé aux : (camera numérique HD, logiciel de traitement) est indispensable. En effet, le signal vidéo sortant de toute camera de prise de vue est pratiquement toujours bruité pour qu'un traitement analogique simple suffise à délivrer un signal défaut fiable.



## 2.5. TRAITEMENT D'IMAGES

---

Ainsi, dans pratiquement tous les cas de visualisation optique, il faut, pour obtenir des images reconstituées de bonne qualité et envisager une détection automatique des anomalies sur celle-ci, mettre en œuvre un système élaboré de traitement d'images. Ce système a pour premier but d'améliorer la qualité de l'image sur le plan de contraste et du niveau de bruit ; il doit en second lieu très souvent prendre en compte la morphologie de l'hétérogénéité recherché en vue de rendre l'image reconstituée parfaitement exploitable.

Ces traitements, qui peuvent être relativement complexes, ne peuvent être mis en œuvre que par voie numérique, ce qui entraîne la nécessité de disposer derrière la camera d'un système de numérisation rapide, d'une ou plusieurs mémoires d'images (Video-RAM, carte CSD,...) et d'un mini ordinateur adapté au traitement d'images en temps réel. Les outils mathématiques utilisables sont nombreux et variés, nous nous contenterons de mentionner ici les opérateurs linéaires (filtre cardinal, filtre de Laplace), et non linéaire (filtre de Sobel, de Kirsh, de Prewitt) et statistique (Markovien), la convolution bidimensionnelle, l'analyse fréquentielle de Fourier,... etc .

### 2.5.1 Logiciel PIVlab

#### Préface

PIVlab est un logiciel open-source de vélocimétrie d'image de particules (PIV) qui ne calcule pas seulement la distribution de vitesse dans les paires d'images, mais peut également être utilisé pour dériver, afficher et exporter plusieurs paramètres du modèle d'écoulement. Une interface utilisateur graphique (GUI) conviviale rend les analyses PIV et le post-traitement des données rapides et efficaces.

#### Installer

Le moyen le plus simple est de double-cliquer sur le fichier 'PIVlab.mlappinstall' pour installer PIVlab en tant qu'application dans MATLAB ou MALAB Online R2020b.

Dans cette mémoire, nous avons utilisé MALAB Online R2020b

## 2.6. CONCLUSION

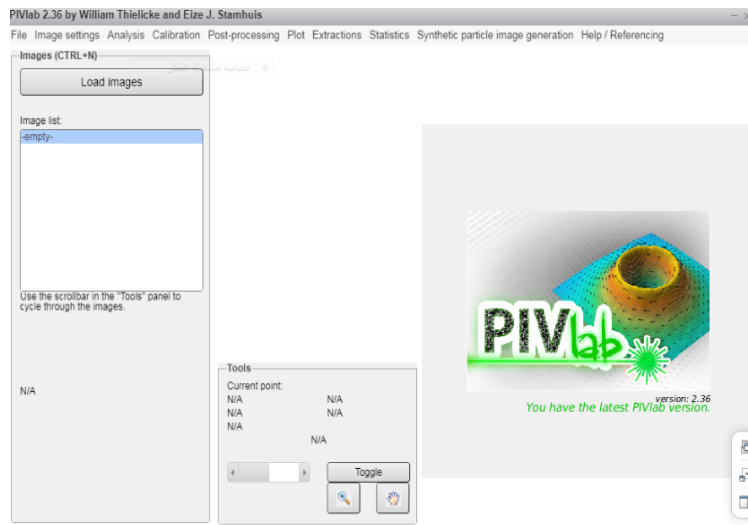


Figure 2.5: interface PIVlab MALAB Online R2020b

## 2.6 Conclusion

Les expériences réalisées lors de cette étude sont plus simples mais à pour un but plus important de traitai des images des graines de sable captent sur un tas (amas). On utilise un micro-ordinateur à cette traitement d'information, la qualité des images obtenues fait une partie plus intirécent lors de traitement

# Bibliographie

- [1] Combe, Anne-Laure. Comportement du sable d'Hostun S28 au triaxial axisymétrique. Comparaison avec le sable d'Hostun RF. PhD Thesis. MA thesis, Université Joseph Fourier (cit. on pp. 44, 58, 59, 69, 70).1998.
  
- [2] Regniers, Olivier. Méthodes d'analyse de texture pour la cartographie d'occupations du sol par télédétection très haute résolution: application à la forêt, la vigne et les parcs ostréicoles. PhD Thesis.2014.
  
- [3] Khalid El Asnaoui. Indexation et recherche d'images par le contenu: Algorithmes et application au Lifelogging. PhD Thesis. Université Moulay Ismail.2017.

# Chapitre 3

## Resultats et discussions



L'étude des milieux granulaires humides est encore plus récente que celle des milieux granulaires secs. L'eau lorsqu'il est en mouvement, il déploie son énergie qui peut arracher d'importantes quantités de grains de sable qui risque à éroder le flanc d'un amas de sable. Sous l'action de ce flux, les grains de sable le long de leur voyage agissent comme un véritable mécanisme abrasif (le sable est ainsi à la fois agent et produit d'érosion) . Après un voyage plus ou moins long dans l'espace et dans le temps, les grains finissent par se déposer en formant des fractales.

## 3.1 Introduction

Le présent projet est une étude environnementale qui se présente sous la forme d'un banc d'essai pédagogique permettant d'effectuer une série d'expériences qui mettent en valeur des structures hydrologiques variées que l'on rencontre lors de l'écoulement de l'eau sur une topographie comme le flanc d'un tas en grain de sable. Pour comprendre cette diversité de structures, il faut se pencher sur le chemin parcouru par les grains de sable, la manière dont ils ont été amorcés et sur leurs comportements physiques et mécaniques (cycle de grains).

La présente partie concerne l'histoire des grains de sable voyageurs (altération, transport, dépôt et La diagenèse) sur un tas de grains de sable humides.

Mise en œuvre à l'état humide d'un tas de sable, elle permet d'obtenir un matériau résistant grâce à la grande hétérogénéité de taille de grain à laquelle elle doit la compacité et la rigidité de son squelette granulaire .

On commence avec l'eau, afin de rappeler ce que sont les forces capillaires. Puis on observe la cohésion capillaire qui permet à l'eau de faire tenir les grains entre eux dans un tas de sable. La série d'expériences suivante montre en un ensemble les autres rapports particuliers que la matière en grain entretient avec les liquides (les phénomènes de ségrégation granulaire).

Ce dispositif est basé sur la captation de l'érosion d'un amas en sable à l'aide d'une caméra suivie d'un traitement numérique par ordinateur pour visualiser le comportement du flanc d'un amas à partir d'un scénario choisi et la projection du rendu sur le sable par un projecteur vidéo.

## 3.2 Description initiale de tas de sable

Le "tas de sable" est un nom commode pour désigner les matériaux granulaires. Chaque fois que l'on entasse plusieurs centaines de milliers d'objets et que les interactions entre ces objets sont semblables à celles qui existent entre des blocs durs, on a affaire à un matériau granulaire. Autrement dit, un matériau granulaire est un matériau formé de grains (de taille supérieure à  $100\ \mu\text{m}$ ), ces derniers étant des

"parties élémentaires discernables de l'ensemble" (Encyclopédie Universalis). Généralement, ces grains sont arrangés de manière désordonnée et présentent souvent des différences de forme, de taille et d'état de surface[1].

### 3.2.1 La pente d'équilibre

Un tas de sable au repos a une structure conique d'angle à la base  $\theta$  imposée par des propriétés de dynamique et de statique des milieux granulaires[2].

Si l'on verse du sable sur une surface plane avec un débit constant, les grains forment tout d'abord un petit tas dont la base grandit au fur et à mesure que le monticule s'élève. Puis, très vite, la pente atteint un angle maximal qui se stabilise. C'est la pente d'équilibre, appelée aussi angle de repos ou angle de talus.

Si cette pente devient trop inclinée, on observe de petites avalanches qui rétablissent l'angle initial. L'angle au delà duquel la pente du sable devient instable est appelé l'angle d'avalanche[3].



Figure 3.1: avalanche de tas de sable[3]

## 3.3. VISUALISATION GÉNÉRALE

## 3.2.1.1 L'impact d'une goutte d'eau sur une surface en grains de sable

Munis d'une caméra à haute vitesse, des chimistes ont filmé la chute de gouttes d'eau sur du sable. Découvrez en vidéo comment l'eau tombant à différentes vitesses forme des impacts à la morphologie surprenante. Les traces ressemblent en effet énormément à celles laissées par des météorites sur la surface terrestre.

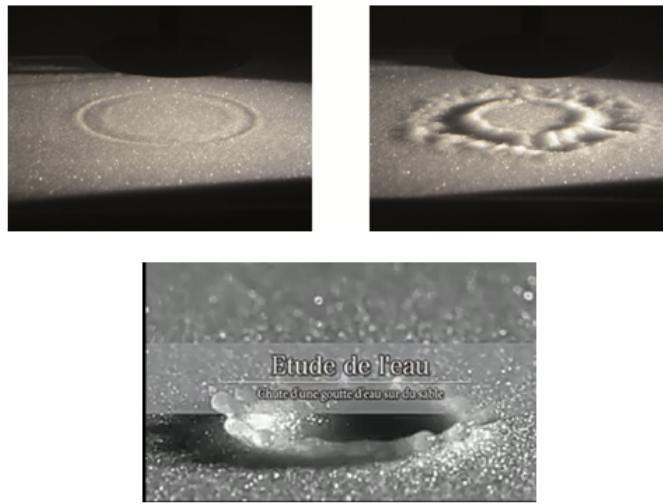


Figure 3.2: gouttes d'eau chutant sur du sable[4]

A une vitesse différent les trace changent et donnant des formes différent[4]:

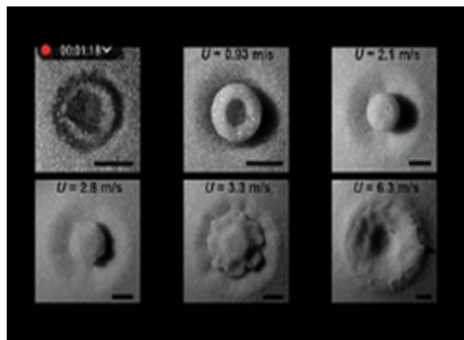


Figure 3.3: gouttes d'eau chutant sur du sable avec en plusieurs plans à différentes vitesses [4]

## 3.3 Visualisation générale

Ce que nous observons est précisément un écoulement uniquement sur la partie supérieure pour un petit angle d'inclinaison. La profondeur d'écoulement augmente avec l'angle

### 3.4. DISCUSSION

---

d'inclinaison, atteignant finalement le fond au-dessus d'un angle donné. Le profil de vitesse à peu près un profil linéaire, suivi d'une queue rampante lente. Cette queue à déformation lente a été soigneusement étudiée dans . Ils ont montré qu'il s'agit d'une exponentielle d'une longueur caractéristique de 5 billes, indépendamment de ce qui coule dessus. Cela rappelle beaucoup la déformation exponentielle observée dans les expériences de cisaillement. En d'autres termes, il semble que nous observions juste une couche fluide avec un profil de vitesse linéaire qui cisaille un tas statique sous[5].

À une telle profondeur, il existe approximativement une abondance à laquelle le mouvement des particules passe d'un écoulement de surface rapide à un mouvement de fluage lent[6].

Pour comprendre ces différences de comportement, il faut bien avoir à l'esprit qu'un ensemble de grain n'est jamais complètement plein. Il est aussi fait de « vides ». L'espace qui se trouve entre les grains est appelé « porosité ». Cet espace est généralement rempli par un ou plusieurs fluides (l'air et l'eau dans le cas de la terre)[7].

Dans la région du mouvement de fluage, les particules sont étroitement coincées. Pour que de telles particules se déplacent, l'existence de vides est essentielle. En fait, des réarrangements locaux de particules sont souvent observés autour de ces vides. Dans la région de fluage, on trouve une déformation plastique globale du réseau formée par des connexions inter-particules. Des vides sont créés occasionnellement par une telle déformation, tandis que cette déformation est maintenue par la contrainte de cisaillement résultant de l'écoulement de surface. l'écoulement de surface lui-même est la source de la contrainte de cisaillement induisant le mouvement de fluage, et à travers ce mécanisme, l'énergie est dissipée vers la masse en dessous[8].

## 3.4 Discussion

Les figures dans les pages suivantes représentent la résultats d'expériences utilisant un programme



## 3.4. DISCUSSION



Figure 3.4: Une image que nous avons analysée

Les images à traiter sont téléchargées dans un dossier créé dans le programme installé Matlab

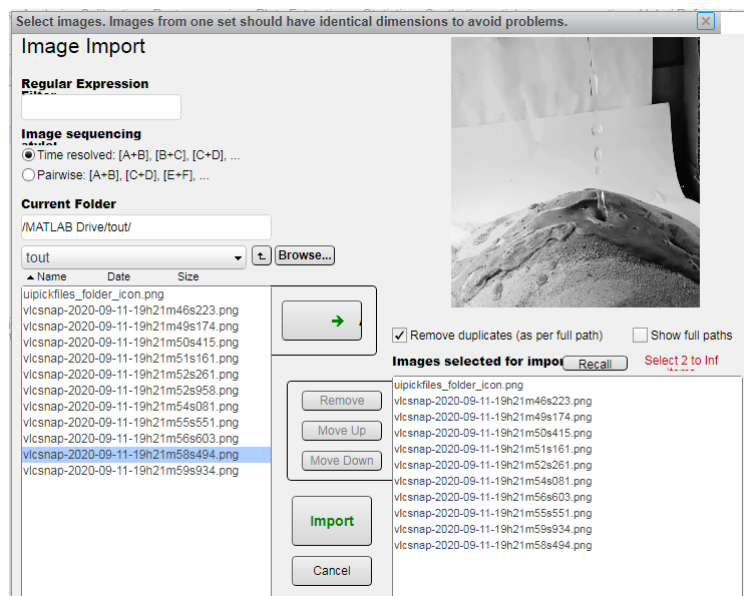


Figure 3.5: Importer l'invite d'image

Le programme Matlab online analyse les images totales de manière séquentielle pour étudier la propagation de l'écoulement

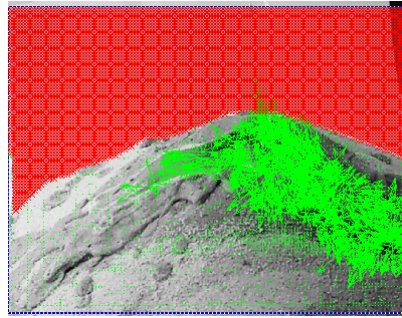


Figure 3.6: Paire d'images analysées, région d'intérêt et masque d'image

Nous étudions tous les vecteurs de vitesse de champ pour préciser le centre de propagation de vitesse

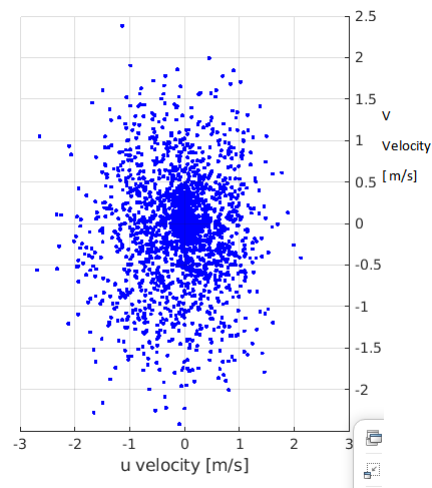


Figure 3.7: Validation vectorielle

Les résultats de vitesse des graines de sable dans le tas

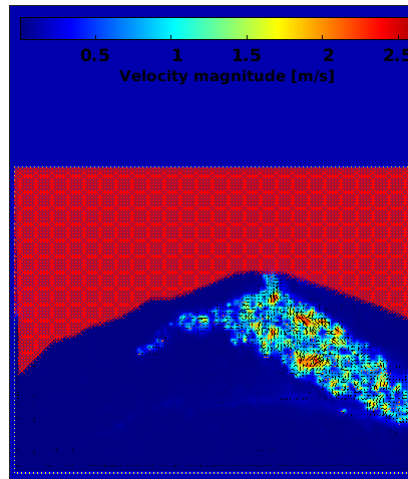


Figure 3.8: Paramètres dérivés: magnitude de la vitesse

L'étude de changement des composants de vecteur de vitesse (u,v) par rapport une ligne horizontale

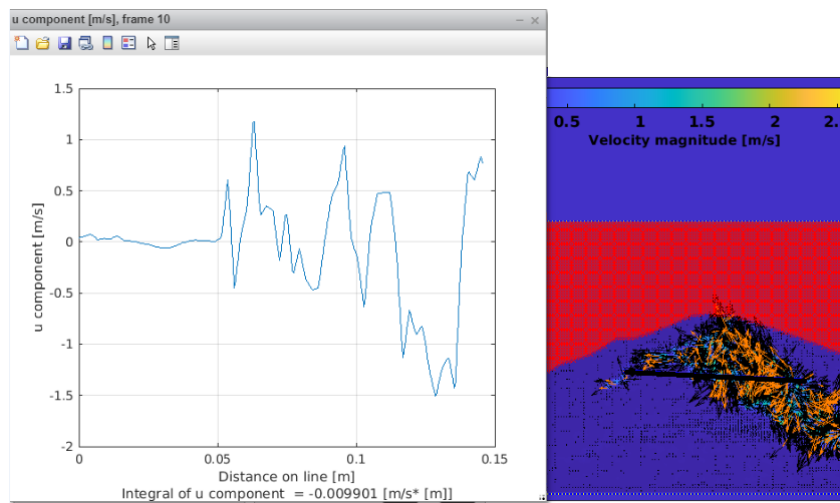


Figure 3.9: Extraction de données le long d'une polyligne (composante de vitesse u)

3.4. DISCUSSION

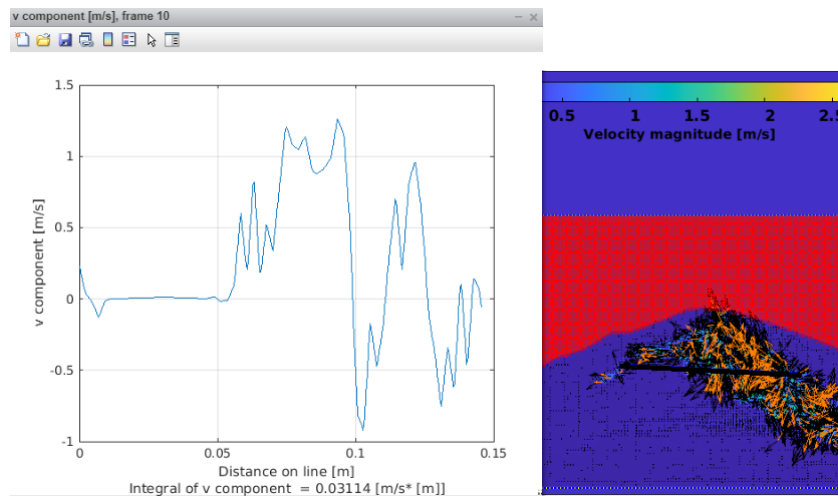


Figure 3.10: Extraction de données le long d'une polygone (composante de vitesse v)

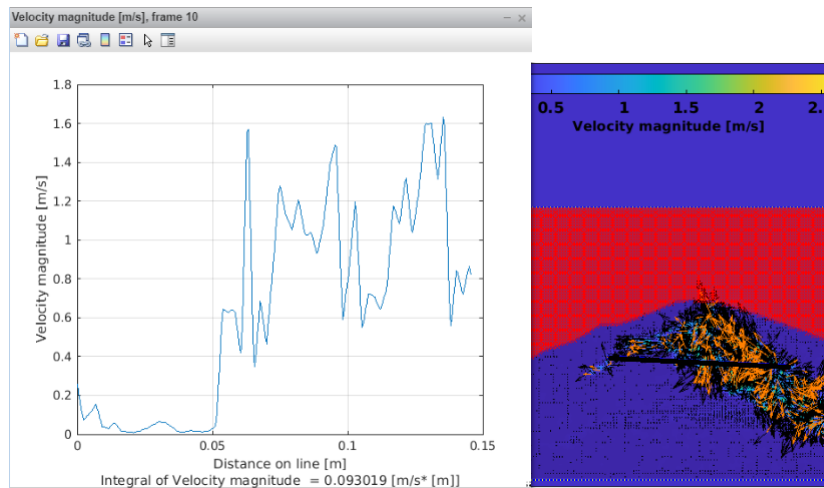


Figure 3.11: Extraction de données le long d'une polygone (magnitude de la vitesse)

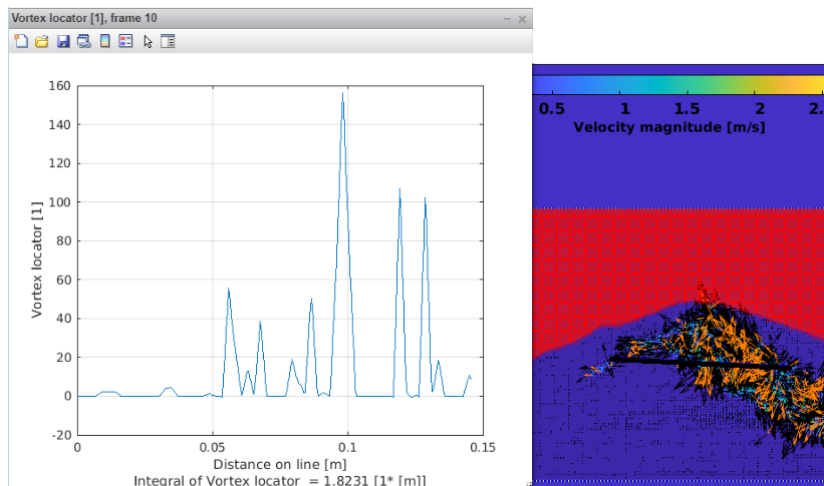


Figure 3.12: Extraction de données le long d'une polygone (Localisateur de vortex )

3.4. DISCUSSION

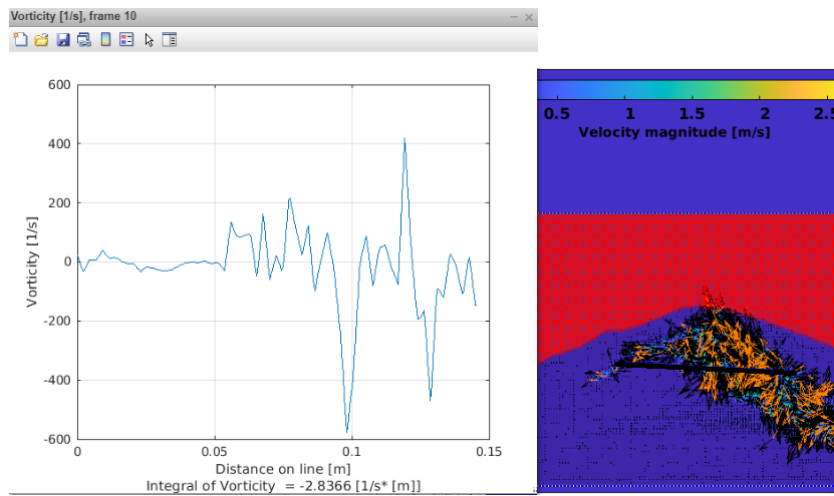


Figure 3.13: Extraction de données le long d'une polygone (Vorticité)

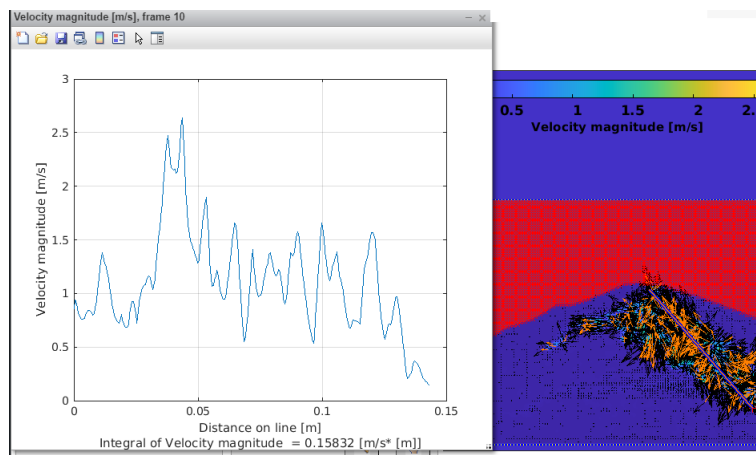


Figure 3.14: Extraction de données le long d'une polygone (magnitude de la vitesse)

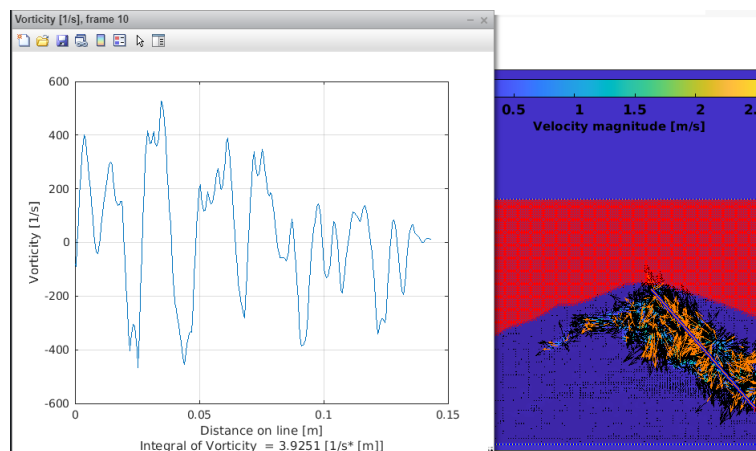


Figure 3.15: Extraction de données le long d'une polygone (Vorticité)

3.4. DISCUSSION

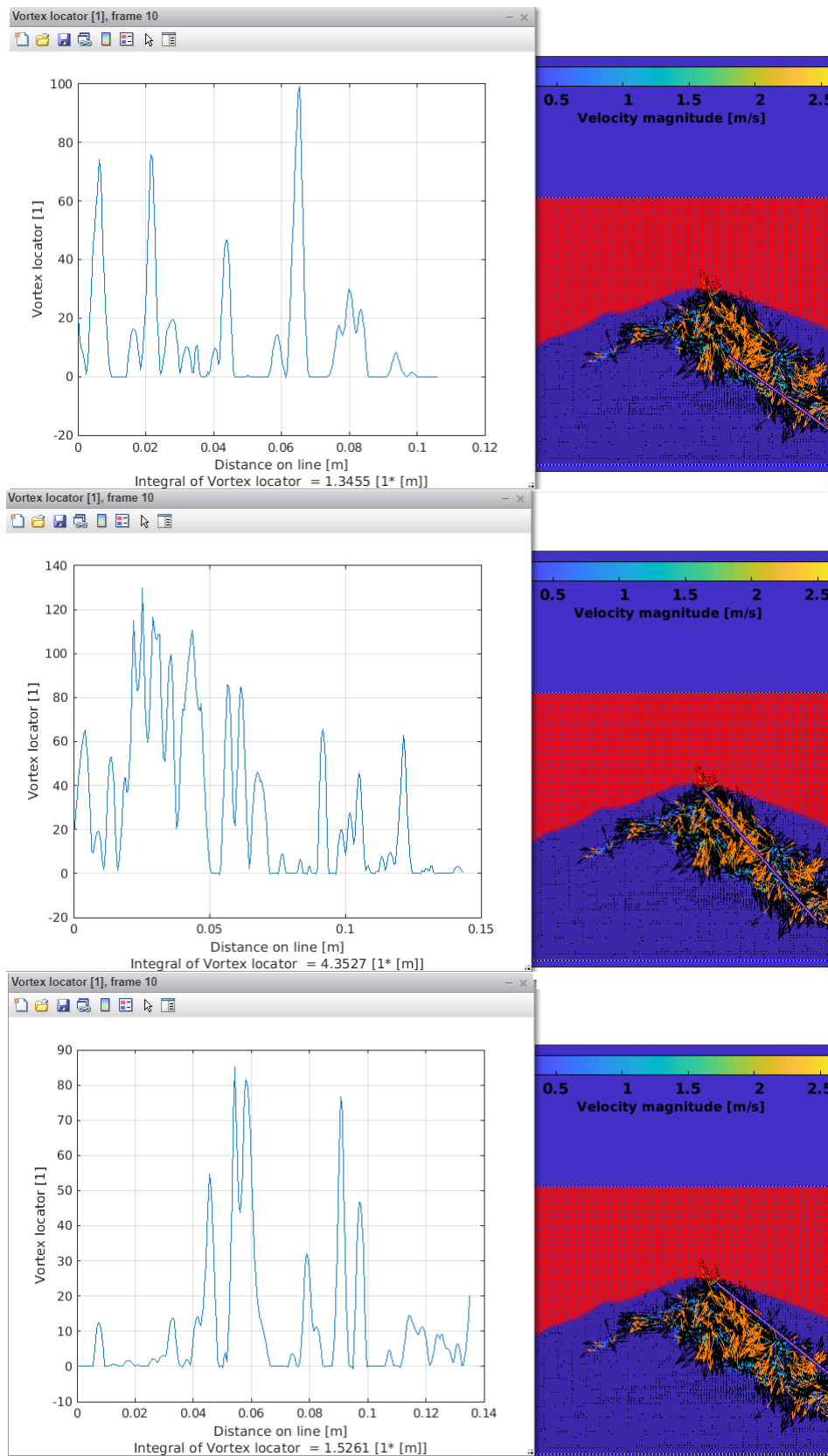


Figure 3.16: Extraction de données le long d'une polygone (Localisateur de vortex )

3.4. DISCUSSION

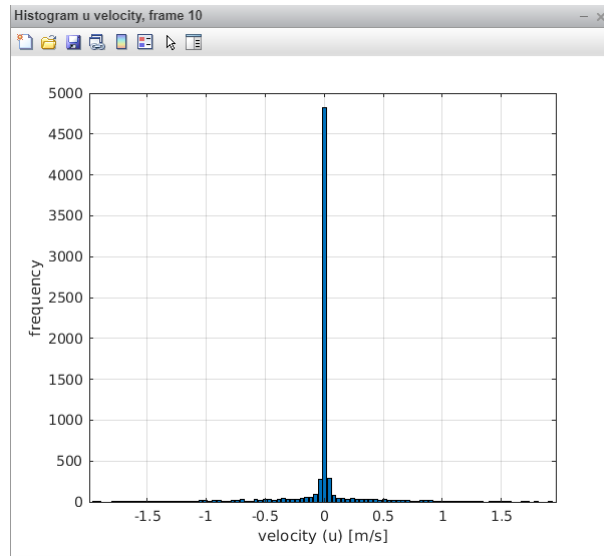


Figure 3.17: u histogramme des composantes de vitesse

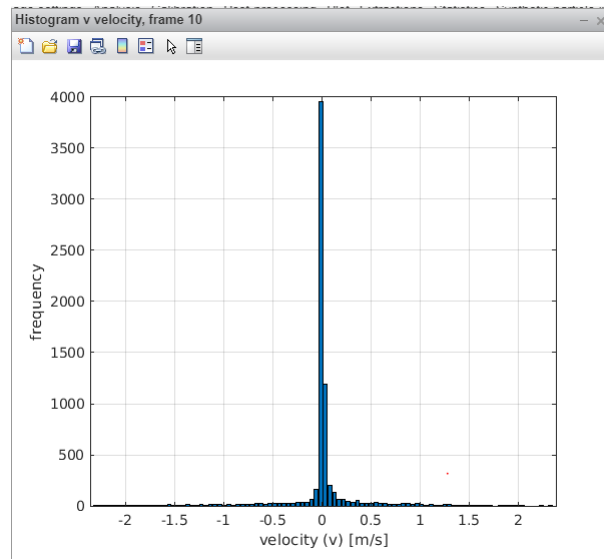


Figure 3.18: u histogramme des composantes de vitesse

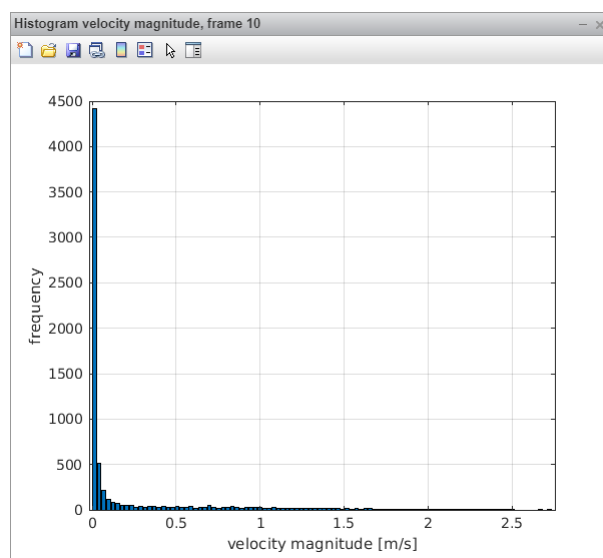


Figure 3.19: histogramme de magnitude de la vitesse

### 3.4.1 Analyse macroscopique

Les différents processus du cycle de vie d'un ensemble de grains sur le flanc d'un tas de sable sec sont caractérisés par l'interaction entre la dynamique de l'eau descendant et la résistance mécanique de l'agrégats de sable liée à sa composition lithologique à travers la densité, la cohésion et le frottement interne entre les grains du sable (Fig3.20) . Pour estimer la résistance d'un tas de sable, il faut connaître la cohésion du sable liée à la granulométrie et la teneur en eau.

Il se crée des ondes de densités alimentées par le haut par des grains plus rapides qui les rejoignent et qui perdent de la vitesse par frottement, tandis que, dans leur partie inférieure, elles libèrent d'autres grains qui prennent de la vitesse . Le phénomène est analogue à un ralentissement sur les autoroutes au cours duquel le ralentissement conduit à une accumulation de véhicules. Le bouchon se déplace à une vitesse qui n'est pas celle des voitures, et en particulier peut se déplacer vers l'arrière. Il existe une certaine parenté entre le phénomène de ségrégation granulaire et celui du dépôt en strates à la fin de la cour d'eau en charriant des grains de sables. L'érosion par frottement direct des flancs des tas de sable entraînées par un flux d'eau ou dévalant des pentes abruptes constitue un facteur fondamental d'évolution de notre environnement. Il serait utile de connaître



## 3.4. DISCUSSION

et de prévoir le comportement de l'ensemble de ces phénomènes.



Figure 3.20: Vue instantanée d'un cycle de repli de la couche extérieure d'un tas de sable

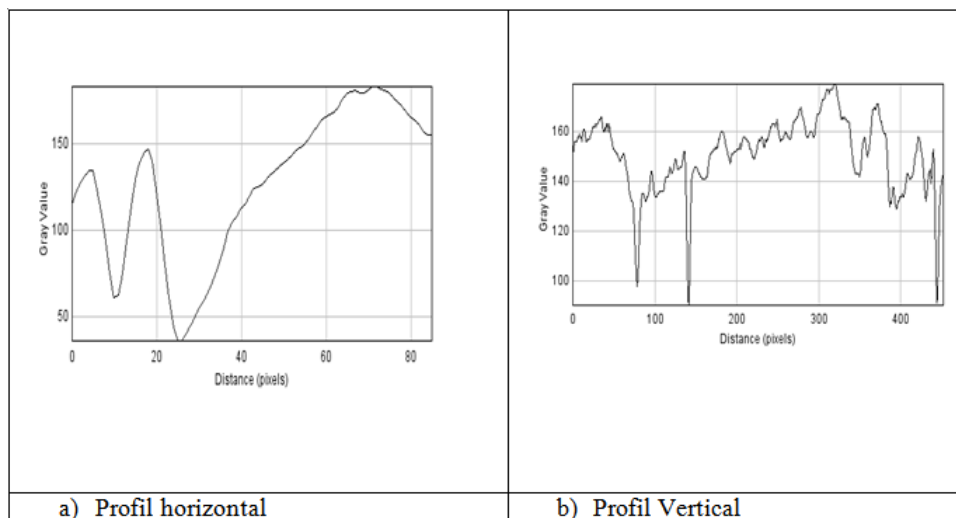


Figure 3.21: Profils instantanés de la couche extérieure d'un tas de sable en utilisant le programme de traitement d'image "image j"

Sous un flux d'eau descendant faible et à partir d'une certaine vitesse de déplacement, l'eau qui recouvre la région d'intérêt de sable emporte les grains de sable par avalanches successives, en fonction de leur poids, et les dépose plus loin. Un phénomène que l'on appelle la ségrégation, c'est-à-dire la séparation de grains de natures et de tailles différentes, par exemple des gros et des petits où les grains s'ordonnant par tailles décroissantes à partir de l'aval vers l'amont. Ainsi, la matrice argileuse peut apparaître comme un

## 3.4. DISCUSSION

ensemble de grains microscopiques mélangés à l'eau.

Au départ, on pense que le sable hydrophobe va se disperser et s'étaler au pied de l'amas. Pourtant au contraire, la mise en mouvement de sable hydrophobe, dont on s'attend à ce qu'elle augmente le désordre du système, réorganise les grains de sable pour former de véritables paysages sous forme d'un sandwich de rides aplatis juxtaposés, décalés l'un sur l'autre et parallèles au sens de déplacement de l'eau. La forme des pâtés est similaire et décroissante dans le sens vertical tout en donnant un gradient négatif. On parle alors de fractales (rides d'oscillation en vertical). En revanche, que ce soit dans les rivières ou dans la mer, le sable forme souvent des rides, comme des minuscules dunes. Ces rides, appelées aussi ripple-marks, se forment dans certaines conditions de courants et sont toujours perpendiculaires au sens de déplacement de l'eau

Ces ondulations se forment selon le même principe que les dunes terrestres : à partir d'une certaine vitesse de déplacement, le fluide qui recouvre le sable (l'air pour les dunes, l'eau pour les ripple-marks) emporte les grains de sable et les dépose plus loin, en fonction de leur poids.

si le mouvement est provoqué par un courant, les rides sont asymétriques. La face exposée au courant est en pente douce, tandis que celle qui est sous le courant a une pente plus abrupte, comme dans le cas des dunes. On parle alors de rides de courant.

Parfois, dans des conditions très particulières, il arrive que ces marques se fossilisent. L'étude de la forme de ces héritages du passé permet alors de reconstituer le sens et la force des courants et de la houle de milieux aujourd'hui disparus et d'en déduire des caractéristiques des écosystèmes d'alors.



Figure 3.22: ripple-mark sur un sable humide

## 3.4. DISCUSSION

L'argile présente des caractéristiques physiques et mécaniques très différentes des autres grains minéraux. Elle passe d'un comportement plastique (ou élasto-plastique) à un comportement (quasi-) fragile lorsque sa teneur en eau diminue. Le sable est constitué de matériaux rigides avec un comportement élastique linéaire

Tout se passe comme s'il y avait deux systèmes de référence : d'une part, l'empilement granulaire (quasi-)rigide, qui se désature nécessairement si on réduit le potentiel chimique de l'eau et, d'autre part, le gel colloïdal infiniment déformable qui ne fait que se contracter en expulsant de l'eau libre

## 3.4.2 Analyse microscopique

Deux éléments chimiques seulement, le silicium Si et l'oxygène O, comptent pour près des trois quarts (pourcentage massique : 74,3% ) de l'ensemble des matériaux de la croûte terrestre. Il n'est donc pas surprenant qu'un groupe de minéraux composés fondamentalement de Si et O avec un certain nombre d'autres ions, et nommés silicates, compose à lui seul 95% du volume de la croûte terrestre. Lors de la formation de la terre, les éléments légers, comme l'oxygène et le silicium ont migré vers l'extérieur, alors que les éléments plus lourds, comme le fer, se sont concentrés au centre. Les graviers, le sable et le silt, la plupart du temps, sont des silicates (le quartz est un silicate). Les argiles font partie de la famille des phyllosilicates (du grec phullon " qui a l'aspect de feuille " ). Tous les silicates possèdent une structure de base composée des ions  $Si^{4+}$  et  $O^{2-}$  (Fig3.23).

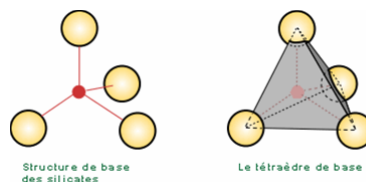
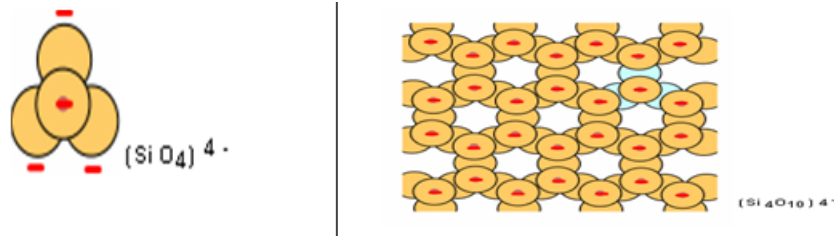


Figure 3.23: L'analyse microscopique d'un silicate: Ce tétraèdre composé de 4 atomes d'oxygène et d'un petit atome de silicium en son centre est la brique élémentaire de tous les silicates (argiles et sables compris)[9]

Si on relie les centres des oxygènes, on obtient un volume qui forme un tétraèdre, le tétraèdre de base (Fig3.24.). Le silicium occupe le centre du tétraèdre. Le calcul des

## 3.4. DISCUSSION

charges électriques montre qu'un tétraèdre est chargé négativement. Ce tétraèdre est la brique élémentaire de la structure atomique de nos grains et de nos argiles[9].



a : Ce tétraèdre est chargé négativement b: Couche tétraédrique des feuillets d'argile vue de dessus

Figure 3.24: La structure atomique [3]

Pour les argiles, la situation est beaucoup plus complexe et les structures sont multiples et variées. Les éléments, au lieu de se répartir selon des structures en trois dimensions, se structurent selon des plans. Nos tétraèdres s'assemblent pour former une « couche tétraédrique » associée à d'autres structures planes (« couche octaédrique ») qui viennent « s'empiler » par-dessus. Souvent les structures lamellaires obtenues ne sont pas électriquement neutres : les surfaces sont généralement chargées. Les argiles sont des particules à faciès lamellaire qui font partie de la famille des phyllosilicates (du grec phullon « qui a l'aspect de feuille »). Cette spécificité de forme, alliée à leur taille microscopique, les conduit à exhiber une surface très grande par rapport à leur masse. La « surface spécifique » d'une particule désigne ce rapport surface/masse. Cette notion est fondamentale, puisqu'à mesure qu'une particule diminue, ce sont ses propriétés de surface qui prennent le dessus. Le mot « colloïde », qui fait référence à la fois aux dimensions microscopiques des particules et au pouvoir collant de la matière, prend tout son sens. Ainsi, paradoxalement, dans la matière en grain, « la division fait la force »

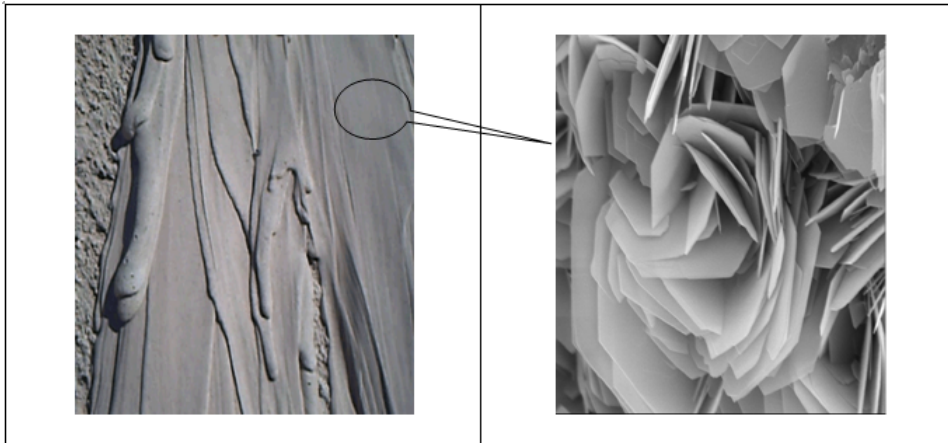


Figure 3.25: vue microscopique de La face exposée au courant d'eau

### 3.4.3 Mécanismes de cohésion entre grains en présence d'eau

La cohésion dans les milieux granulaires a de multiples origines possibles, aussi bien de type physique que chimique. Les mécanismes de cohésion sont pour la plupart des phénomènes locaux qui permettent de lier des grains entre eux, contribuant ainsi à la tenue mécanique du milieu granulaire dans son ensemble. Quelques-uns des principaux mécanismes de cohésion fréquemment rencontrés dans les milieux granulaires humides sont présentés dans cette section, la présence d'eau n'étant pas forcément une condition nécessaire (sauf dans le cas de la cohésion par capillarité, bien sûr !).

#### 3.4.3.1 Les forces de Van der Waals

Les forces de Van der Waals ont été étudiées dès les années 1930 par Hamaker [1937]. Ces forces dépendent des matériaux en contact, à travers la constante de Hamaker, et de la distance d'interaction.

L'expression "forces de Van der Waals" est en fait un terme collectif qui regroupe différents phénomènes d'interactions pouvant survenir entre des molécules ou des particules. L'interaction totale de Van der Waals résulte de la combinaison de trois types d'interactions :

3.4. DISCUSSION

$$E_{V_{aDeWaaals}} = -\frac{1}{r^6} \left[ \frac{2\mu_1^2\mu_2^2}{3(4\pi\epsilon_0\epsilon_r)^2 K_B T} + \frac{\alpha_1\mu_2^2 + \alpha_2\mu_1^2}{(4\pi\epsilon_0\epsilon_r)^2} + \frac{3h}{2} \frac{\alpha_1\alpha_2}{(4\pi\epsilon_0\epsilon_r)^2} \frac{v_1 v_2}{v_1 + v_2} \right] \quad (3.1)$$

- les forces dipolaires correspondant au terme de Keesom,  $E_{keesom} = -\frac{1}{r^6} \left[ \frac{2\mu_1^2\mu_2^2}{3(4\pi\epsilon_0\epsilon_r)^2 K_B T} \right]$
- les forces de polarisation traduites par le terme de Debye,  $E_{Debye} = -\frac{1}{r^6} \left[ \frac{\alpha_1\mu_2^2 + \alpha_2\mu_1^2}{(4\pi\epsilon_0\epsilon_r)^2} \right]$
- les forces de dispersion exprimées par le terme de London.  $E_{Lodon} = -\frac{1}{r^6} \left[ \frac{3h}{2} \frac{\alpha_1\alpha_2}{(4\pi\epsilon_0\epsilon_r)^2} \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \right]$

on a utilisé les notations suivantes :

- $\epsilon_0$  est la constante diélectrique du vide ;
- $\epsilon_r$  la permittivité relative du milieu ;
- $h$  la constante de Planck ;
- $K_B$  la constante de Boltzmann ;
- $T$  la température thermodynamique (en K) ;
- $r$  la distance moyenne entre les molécules considérées ;
- $\mu_1$  et  $\mu_2$  les moments dipolaires des molécules considérées ;
- $V_1$  et  $V_2$  les fréquences électroniques d'ionisation (en Hz) ;
- $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  les polarisabilités électroniques.

Ces forces intermoléculaires dépendent de la distance de séparation  $D$  des molécules ; elles sont inversement proportionnelles à  $D^7$ . Lorsque ces actions intermoléculaires sont intégrées entre des corps macroscopiques, comme par exemple des particules sphériques, la force résultante est moins sensible à la distance de séparation, elle est inversement proportionnelle à  $D^2$  dans le cas d'interaction sphère-sphère :

$$F_{vw} = \frac{A.R}{12.D^2} \quad (3.2)$$

3.4. DISCUSSION

---

où  $R$  est le rayon des sphères,  $A$  est la constante de Hamaker

**3.4.3.2 Les forces électrostatiques**

Dans un système de deux charges  $q_1$  et  $q_2$ , chaque charge exerce sur l'autre une force électrostatique, dirigée selon la droite qui relie les deux charges et dont l'intensité est donnée par la loi de Coulomb :

$$E_{\text{électrostatique}} = \frac{|q_1 \cdot q_2|}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r D^2} \quad (3.3)$$

$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{C}^2 \text{J}^{-1} \text{m}^{-1}$  est la permittivité du vide,  $\epsilon_r = 80$  est la permittivité relative de l'eau et  $D$  la distance entre les charges. Cette force est attractive si  $q_1$  et  $q_2$  sont des signes opposés et répulsive si  $q_1$  et  $q_2$  sont de même signe. Et contribue dans ce dernier cas à la cohésion entre les particules.

**3.4.3.3 Ponts liquides : forces capillaires**

La présence de ponts liquides au sein de milieux granulaires génère des forces de cohésion entre les grains. Ces forces dépendent de la quantité de liquide présent dans le milieu et de ses propriétés. Haines [1925] et Fisher [1926] furent les premiers à proposer une expression pour la force capillaire entre deux particules sphériques. Afin d'estimer la force capillaire, nous nous concentrons dans un premier temps au cas d'un pont liquide entre particules de même taille (Fig. 3.26).

Le rayon de courbure  $r_1$  est considéré constant, le pont liquide a ainsi la forme d'un toroïde. La force  $F_{\text{capillaire}}$  générée par le pont liquide est la somme de la force due à la tension superficielle  $\sigma$  et de la force due à la dépression dans le pont liquide [11] :

$$F_{\text{capillaire}} = 2\pi r_2 \sigma + \pi r_2^2 \Delta p \quad (3.4)$$

où  $\Delta p = p_{\text{gaz}} - p_{\text{liquide}}$  est la différence de pression entre l'air et le pont liquide et  $r^2$  est le rayon de courbure intérieur.

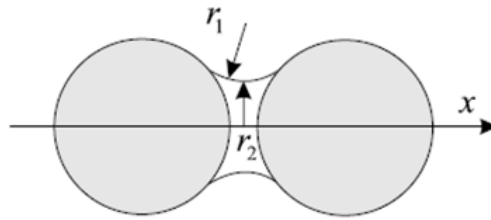


Figure 3.26: Pont liquide entre deux grains de même taille dans le cas de l'approximation toroïdale

#### 3.4.3.4 Liaisons chimiques

De nombreux phénomènes de liaisons chimiques peuvent intervenir dans la cohésion entre particules solides : liaisons hydrogène, métalliques, covalentes.

Les liaisons hydrogène peuvent créer des regroupements de molécules : les molécules s'associent entre elles". Les atomes H créent des liaisons avec des atomes électronégatifs comme O, N, F, Cl... Ce phénomène est très fréquent en présence de molécules d'eau. La liaison hydrogène est une liaison très sensible à la température ; elle est stable dans le cas de températures constantes, mais les variations de température peuvent entraîner très rapidement la rupture de la liaison.

Les liaisons chimiques génèrent des forces de cohésion importantes mais interviennent pour des distances très faibles entre particules, de l'ordre de la distance interatomique.

#### 3.4.4 L'analyse granulométrique

De l'amont à l'aval, la proportion des différentes classes de grains varient. C'est la diversité de taille des grains qui constituent un amas de sable qui permet à l'analyse granulométrique de les classer en catégories distinctes. A chaque type de grain correspond une fourchette de dimensions. Ces variations de proportion impliquent des propriétés physiques et mécaniques différentes. Ainsi on a :

- L'enveloppe d'un grain est le siège de toutes les interactions se produisant avec le milieu environnant (interactions avec l'eau, l'air ou les autres grains). Une seule force dépend de la masse de la particule : la gravité. Or construire, c'est s'opposer à



3.4. DISCUSSION

---

la gravité. Cette idée est récurrente lorsqu'on s'attache à comprendre les mécanismes de cohésion des matériaux granulaires (amas de sable). Au sein de la matière divisée, plus les particules sont fines, plus les interactions de surface ont des chances d'avoir le dessus sur la gravité. Du sable fin étalé sur la face exposée au courant d'eau forme de magnifiques paysages en miniature en pente douce. Il ressemble à une boue, une pâte ou un matériau solide au fur et à mesure que sa teneur en eau diminue. Les particules minérales qui en résultent sont si fines qu'elles se présentent sous la forme d'une pâte de couleur homogène, d'une « sorte de colle » que l'on nomme argile. On a donné le nom de colloïde (du grec kolla, colle, et eidos, sorte de) aux substances qui, comme l'argile, ont cet aspect collant et d'autres propriétés colloïdales. Si on regarde cette section de plus près, on s'aperçoit qu'elle est constituée d'un ensemble de particules solides dispersés dans l'eau. Même à l'état solide, les particules sont reliées entre elles par de petits ponts liquides (les ponts capillaires). Il s'agit donc d'une « dispersion colloïdale ».

- tandis que celle qui est sous le courant (fig3.27.), les grains de grand taille se sont des grains à morphologie sphéroïdale, plus ou moins anguleux qui se réorganisent selon un angle de repos avec une pente plus abrupte de la même manière que certains de nos paysages en terrains meubles sont modelés par l'angle de talus.

Tous ces grains peuvent être séparés selon leur taille à l'aide de tamis. Pour correctement effectuer cette séparation, il faut réaliser un tamisage par voie humide. Une fois que les grains ont été suffisamment nettoyés pour les libérer de leur gangue d'argile, on observe une différence nette de couleur entre les minéraux altérés et les argiles.

## 3.4. DISCUSSION

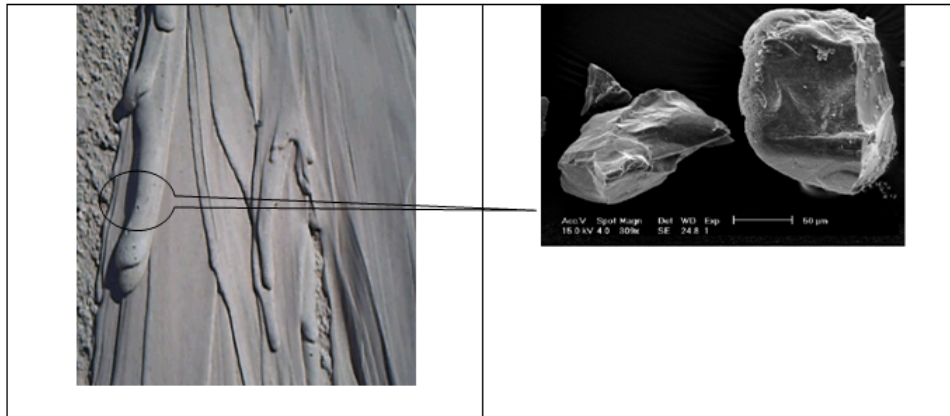


Figure 3.27: L'analyse granulométrique de La face sous le courant d'eau

Ce type d'expérience se compare bien avec celle d'un pavé frottant sur un plan incliné: si l'on incline progressivement le plan, le pavé se met à glisser à partir d'un angle critique  $\theta_c$ . En définissant  $P$  la contrainte normale au plan et  $\tau$  la contrainte tangentielle, le pavé se met à glisser à  $\frac{P}{\tau} = \tan \theta_c$ , ce qui permet de définir un coefficient de friction  $\mu_s = \tan \theta_c$ . Il est possible de faire la même chose dans le cas d'un milieu granulaire, puisque l'écoulement du milieu ne se fait qu'à partir d'un certain angle qui définit ainsi un coefficient de friction  $\mu_s$ . Il faut cependant bien voir que ce coefficient de friction émerge du comportement collectif des grains, et est donc différent du coefficient de friction solide entre les grains. La différence importante pour un milieu granulaire est la dépendance du seuil d'écoulement avec la pression du milieu: plus la pression est élevée, plus la contrainte tangentielle appliquée doit être grande pour permettre la mise en écoulement.

### 3.4.5 Formation de rides

Le mécanisme actuellement admis pour la formation des rides est le suivant. À partir d'une déformation de faible amplitude du lit, une différence de valeur de la contrainte locale et de la vitesse des grains se crée entre le fond d'une déformation (creux) et son sommet (crête). Le débit granulaire augmente alors le long de la face en amont et diminue sur la face aval, on a donc une érosion du côté de la face amont et une déposition du côté de la face aval, entraînant une propagation des rides dans la direction de l'écoulement.

### 3.5. CONCLUSIONS

---

L'amplification des rides, quant à elle, provient d'un décalage de phase entre la contrainte de cisaillement à la surface du lit granulaire et la hauteur locale du lit de grain, entraînant un amoncellement du nombre de particules au sommet. Ce décalage de phase est dû à la présence du fluide environnant et des effets inertiels qu'il induit. Ce mécanisme d'instabilité hydrodynamique est applicable à tout écoulement, turbulent ou visqueux [10].

## 3.5 Conclusions

L'eau a en général un effet très sélectif sur la taille des grains. L'énergie d'un courant d'eau détermine si les particules se déposent ou poursuivent leur chemin. Après un voyage plus ou moins long dans l'espace et dans le temps, les grains de sable finissent par se déposer. Le dépôt des sédiments a lieu lorsque la vitesse du courant d'eau (agent de transport) diminue ou lorsqu'il disparaît. Dans certains cas, ce n'est qu'un repos provisoire avant un nouveau transport, mais dans d'autres cas, la mise en place est définitive et les apports successifs de sédiments vont s'empiler progressivement. La plupart du temps, le transport des grains ne se fait pas de manière continue mais de manière cyclique, au rythme de phénomènes exceptionnels (avalanches, glissement de flanc, etc.). Les dépôts se font de manière intermittente. Les sédiments forment alors des fractales en forme de couches laminaires appelées strates. Ces formations sont liées à l'instabilité des flancs. Les zones de dépôts les plus courantes peuvent se classer en fonction du mode de transport qui les a précédés.

Ainsi, les grains de sable sont éphémères, ils ne constituent qu'un état transitoire de la matière minérale. Ils font partie d'un grand cycle de transformation qui se répète inlassablement.

# Bibliographie

- [1] Lycée JJ Henner, Altkirch" LA PHYSIQUE DES MILIEUX GRANULAIRES"  
Olympiades de Physique 2010
- [2] Frédéric Élie "Tas de sable et parabole Une introduction à la physique des milieux  
Granulaires", juillet 2014
- [3] Romain Anger"grains de bâtisseurs la matiere en grains, de la geologie a  
l'architecture" décembre 2005
- [4] Par Jonathan Sare, Futura(09/10/2019)
- [5] StéphaneDouady\*, Bruno Andreotti, Adrian Daerr, Pierre Cladé"From a grain to  
avalanches: on the physics of granular surface flows"11 December 2001
- [6] Teruhisa S. Komatsu et al "Creep motion in a granular pile exhibiting steady surface  
flow "(2001)
- [7] Romain Anger"grains de bâtisseurs la matiere en grains, de la geologie a  
l'architecture" décembre 2005
- [8] Teruhisa S. Komatsu et al "Creep motion in a granular pile exhibiting steady surface  
flow "(2001)
- [9] <http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s2/princ.mineraux.html>
- [10] M. Joris Bouteloup "Simulation numérique de la dynamique d'un lit granulaire cisailé  
par un fluide visqueux". Dynamique des fluides .Institut National Polytechnique de  
Toulouse (INP Toulouse).2017

- 
- [11] Soulié, Fabien. Cohésion par capillarité et comportement mécanique de milieux granulaires. PhD Thesis. Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc. 2005.

# Conclusion générale

---

Pendant longtemps, le sable a constitué une énigme de la physique contemporaine. Les scientifiques ne comprenaient pas comment des excitations extérieures comme l'eau pouvaient être à l'origine de différents types de dépôts et de paysages aussi complexes (les fractales). Ainsi, Le sable et l'eau sont particulièrement complémentaires. Le sable apporte les forces de contacts et de frottements, l'eau apporte la cohésion.

Un simple tas de sable constitue à lui seul une mine d'informations. Son organisation révèle en particulier l'existence des forces de frottements, qui sont responsables de la pente du tas. Par conséquent, le sable se révèle être un outil particulièrement simple et intéressant pour explorer la géométrie des surfaces à pente constante.

Pour atteindre l'objectif tracé dorénavant, un optimum de teneur en eau est recherché pour lequel le sable mouillé est particulièrement cohésif. Dès qu'il est trop mouillé, il perd sa cohésion. Ceci est lié à la formation de ponts liquides et de ménisques entre les grains. Dans un premier régime, la cohésion augmente avec l'humidité relative, pour atteindre un optimum. Au-delà, lorsque la présence de film liquide devient visible, la cohésion s'écroule rapidement pour finalement s'annuler lorsque le sable est saturé, c'est-à-dire lorsque tout l'espace poreux est rempli d'eau.

L'eau joue en particulier un rôle important dans tous les phénomènes de transport des particules. Si on fait couler des gouttes d'eau sur le flanc de l'amas, peu à peu se dessine un relief d'érosion. Le débit de l'eau arrache les grains de silt et creuse des stries plus ou moins verticales et le flanc commence à se fractaliser. La force qui fait glisser les grains dépendant du volume et celle qui les retient dépendant de la surface, lorsque la taille des particules augmente, la force qui fait descendre les grains devient plus importante que celle qui les retient. Dans un tas de sable humide, la cohésion due aux forces capillaires renforce la contrainte normale en plaquant les grains voisins, ce qui entraîne une augmentation de l'angle maximal de stabilité

# Perspectives



---

L'étude des milieux granulaires humides est encore plus récente que celle des milieux granulaires secs. En 1997, une équipe de recherche publiait un article très sérieux intitulé : "What keeps sandcastles standing" ([Hornbaker, Albert, Barabási, Schiffer, 1997 [74]). Un tas de sable doit sa cohésion à de petits ponts liquides qui se forment entre les grains. On voit donc qu'entre un tas de sable, un mur en béton et un mur en pisé se dessinent des problématiques communes.

Donner des explications claires à ces phénomènes tels que la formation d'avalanches, de dunes ou de voutes, ou bien encore la ségrégation, les décrire avec précision, ou simplement les maîtriser correctement n'est cependant pas une mince affaire! Les chercheurs s'y attèlent depuis plus d'un siècle, mais les progrès dans ce domaine sont lents car ces matériaux rebelles ne se laissent pas enfermer dans des schémas trop simples. L'étude des granulaires relève donc bien de la physique moderne et le nombre des questions encore sans réponse est véritablement immense! L'intérêt des scientifiques est d'autant plus grand que les enjeux derrière les applications de ces études sont potentiellement considérables tant ces matériaux sont présents à tous les niveaux de l'activité humaine.

La variété des phénomènes spécifiques aux milieux granulaires (secs ou mouillés) rend difficile la description générale de la dynamique de ces milieux notamment aux grandes échelles. De plus, on peut se demander quelle est la limite entre un milieu granulaire sec et mouillé. Ainsi, les scientifiques, par le biais d'expériences contrôlées en laboratoire et de simulations numériques, ont essayé de séparer au maximum les différents paramètres afin de dégager les comportements phénoménologiques liés à ces milieux.