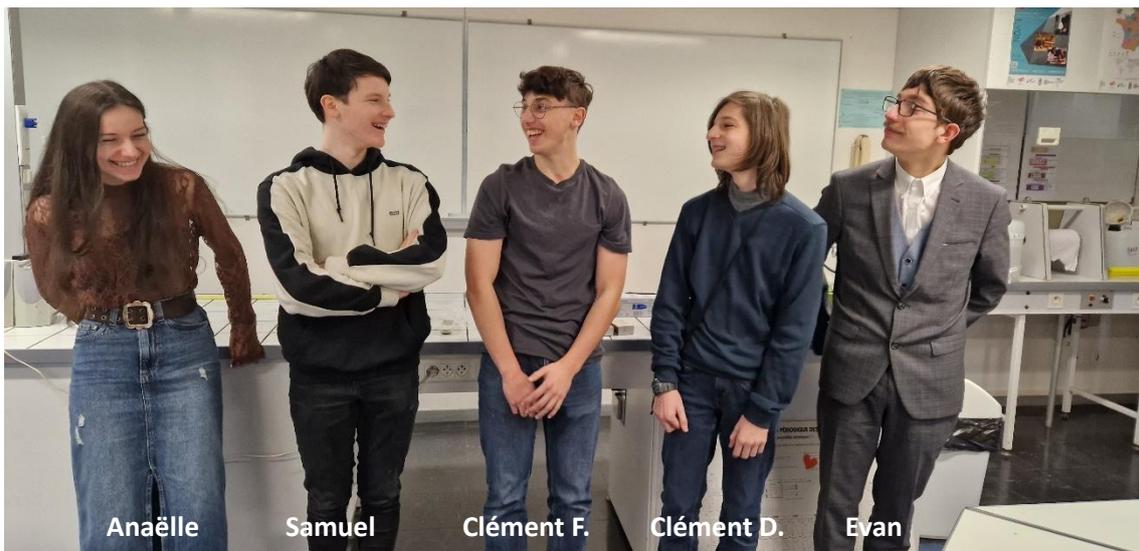


Toujours plus haut !

**Evan GEAY, Samuel DRIOT,
Anaëlle MAGUER, Clément Durupt,
Clément Fauconnet**

Présentation de l'équipe



Anaëlle MAGUER

Le projet *Toujours plus haut* et le groupe m'ont permis à la fois d'expérimenter mais aussi de tenter de comprendre les concepts de manière théorique. J'ai pu tester des dispositifs expérimentaux afin de récolter des données, de les traiter et d'être en contact avec de nombreux outils de mesure qui m'étaient encore inconnus. J'ai également pu participer à la mise en forme du projet en général notamment en gérant le carnet de bord mais aussi en organisant et en corrigeant le mémoire. J'ai appris que même les tests non concluants nous orientaient vers une vision plus juste des phénomènes observés et surtout que les grains de sable étaient un vrai enfer à nettoyer !!

Clément DURUPT

Lors de ma participation au projet toujours plus haut, j'ai activement participé en travaillant en groupe avec mes camarades pour mener les différentes expériences, effectuer des observations et tirer des conclusions. Mon rôle au sein de l'équipe impliquait une contribution active à la collecte de données et à l'analyse de ces dernières. Cette expérience enrichissante m'a permis de développer des compétences pratiques en expérimentation scientifique, d'affiner ma capacité à travailler et surtout, de cultiver ma curiosité intellectuelle. Ces moments partagés dans le club de science ont non seulement renforcé mes aptitudes scientifiques, mais ont également forgé mes capacités à travailler en groupe et à s'organiser en fonction des disponibilités de chacun.

Evan GEAY

Pour ma part, je dois dire que j'ai eu la chance de toucher à tout. Je me suis concentré sur la partie recherche et expériences en début de projet puis j'ai participé à la rédaction du mémoire. C'était super enrichissant ! Que ce soit le travail de groupe, les recherches expérimentales ou les recherches en parallèle de nos expériences, tout fut très intéressant. Ce qui m'a le plus apporté, je pense, ce doit être la recherche expérimentale. Il s'agit d'un mode de recherche totalement différent de celui que l'on utilise en cours. Je suis ravi d'avoir pu participer à ce projet. C'est une expérience à renouveler !

Samuel DRIOT

Tout au long de ce projet, j'ai pu mener à bien certaines expériences, aider à trouver les conclusions à tirer et j'ai enfin participé à la synthèse de nos résultats. Toutes ces étapes ont été très enrichissantes pour moi, que ce soit du point de vue du travail de groupe ou de l'étude d'un phénomène physique très vaste. En effet, les activités que nous avons pu faire étant à la fois éloignées de ce qu'on peut apprendre dans un cadre scolaire, et si intéressantes du point de vue personnel, je ne regrette pas une seconde du temps que j'ai pu passer dans le club ! D'une manière plus concrète, j'ai pu apprendre beaucoup de choses en termes de gestion d'un travail de groupe ou de la façon d'aborder une question aussi vaste.

Clément FAUCONNET

Le projet « *Toujours plus haut* » m'a aidé à me familiariser avec la démarche de recherche scientifique. En effet, tout au long de ce projet, j'ai pu imaginer des expériences et produire des raisonnements scientifiques qui m'ont passionnés. Grâce à un travail d'équipe, nous avons pu construire notre projet et donner un aboutissement à notre démarche. Ce projet m'a aidé à mieux comprendre certains phénomènes physiques, à mieux travailler en groupe, formuler et répondre à des problématiques. Cette expérience a donc été extrêmement enrichissante !

Résumé :

Notre projet porte sur la réalisation de stalagmites de sable. Le but était d'en réaliser tout en maîtrisant les paramètres permettant d'en obtenir. Gravité, force de tension superficielle, débit, taux d'humidité ont été par exemple des notions avec lesquelles nous avons dû jouer au quotidien. Pour cela, nous avons dû concevoir et créer des dispositifs expérimentaux, trouver des solutions et des explications à des phénomènes avec lesquels nous n'avions jamais été confrontés. C'est alors que, petit à petit, s'est dessinée notre démarche expérimentale pour laquelle nous avons éprouvé un enthousiasme non dissimulé afin de la mener à bien.

lien vers la vidéo du projet : <https://youtu.be/BItdmzVaW5w>

Sommaire :

I – Approche qualitative

II – Quel dispositif expérimental peut-on confectionner pour réaliser de grandes stalagmites ?

III – Débit de sable et taux d'humidité : un couple à gérer !

IV – Quelle différence obtient-t-on si on utilise d'autres types de grains ?

V - Conclusion

Introduction :

Le sable est vraiment une chose fascinante. Nous avons pu le constater tout au long de nos multiples expériences. En effet, durant ce fabuleux périple nous avons été surpris à de nombreuses reprises. Des résultats inattendus (avec la poudre de verre, par exemple), des expériences toujours plus étranges... Et à vrai dire, même le thème principal du projet semblait surprenant, presque irréel : comment le sable pouvait-il prendre la forme d'une stalagmite en quelques secondes seulement ?

I – Approche qualitative

C'est amusant de voir tout ce qu'on peut faire avec du sable ! Il semble que les idées sont inépuisables ! Nous, nous avons voulu faire des stalagmites de sable. Et surtout, nous avons voulu comprendre quels paramètres interviennent, et comment les ajuster, pour obtenir de grandes stalagmites.

Versons du sable sec sur un support horizontal... Nous obtenons une dune de pente environ 35° (figure 1)

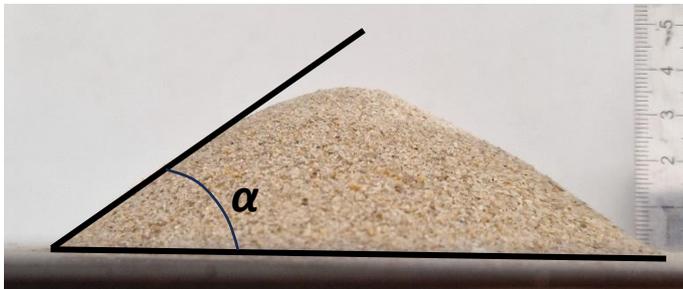


Figure 1 : mesure de la pente d'un tas de sable dans l'air

Pour obtenir une colonne de sable qui ressemble à une stalagmite, il faut ajouter de l'eau au sable. On peut alors bâtir une colonne de sable d'une hauteur assez grande. C'est l'eau ici qui assure la cohésion entre les grains de sable. Mais est-ce vraiment une prouesse ? Il est clair que plus la surface de base de la colonne est grande, plus la hauteur de la colonne sera importante. Nous avons par exemple modelé vite fait une colonne de sable mouillé figure 2.



Figure 2 : colonne de sable mouillé façonnée à la main

Alors au lieu de cela, nous allons faire de véritables stalagmites : de la même manière qu'une stalagmite de calcaire se forme par ajout goutte à goutte d'eau riche en minéraux, nous allons construire la stalagmite de sable en versant du sable par le dessus, grain par grain. Enfin... grain par grain est un peu exagéré. Disons plutôt que nous allons verser du sable petit à petit au même endroit pour que le sable versé s'agglutine au sable déjà déposé. Cela dit, rappelons-le, le sable doit être humide.

Or, faire tomber du sable humide grain par grain n'est pas possible. Il peut par contre tomber petit pâté par petit pâté, ce qui donne finalement un tas de pâtés (figure 3) qui ne ressemble en rien à une stalagmite...



Figure 3 : Amas de sable obtenu en faisant tomber du sable mouillé par motte

Finalement, pour réaliser une stalagmite, nous allons faire tomber du sable sec sur un fond de liquide : figures 4 et 5.

En effet, au fur et à mesure que les grains vont tomber sur ce fond d'eau, celle-ci va monter dans le sable par capillarité, ce qui va assurer la cohésion entre les grains de sable. Les stalagmites que nous voulons réaliser vont faire intervenir en particulier deux processus physiques : la montée de l'eau par capillarité entre les grains de sable, et la cohésion entre les grains de sable par l'intermédiaire de l'eau grâce aux forces de tension superficielle. D'où la problématique suivante :

Compte tenu du cadre dans lequel nous souhaitons réaliser ces stalagmites, qu'est ce qui permettra de réaliser des stalagmites de la plus grande taille possible ? Y a-t-il d'ailleurs une limite à la taille d'une stalagmite de sable et si oui, pourquoi ?

Dans un premier temps, nous avons voulu chercher de façon qualitative les paramètres qui pourraient intervenir dans la formation des stalagmites. Nous avons pu faire cela en présence de Florian Moreau, chercheur à l'Université de Poitiers (Pprime – ISAE ENSMA), avec qui nous avons pu partager nos remarques, nos observations et nos interrogations au cours d'échanges très appréciables.

Nous avons donc versé du sable sec sur un fond d'eau et nous avons observé tout ce que l'on pouvait observer :

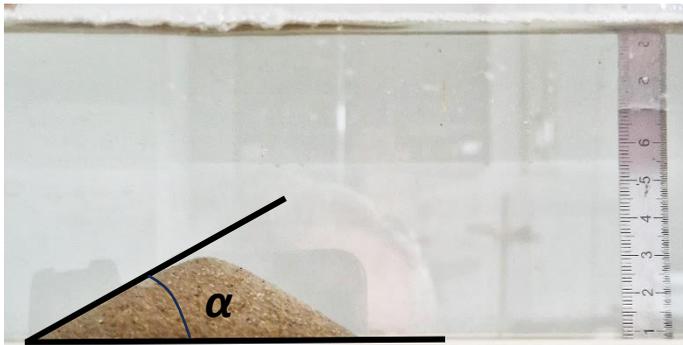


Figure 4 : réalisation d'un tas de sable dans l'eau

Dans un premier temps, on obtient une dune de sable dans l'eau. Nous nous sommes d'ailleurs amusés à comparer la pente de la dune immergée par rapport à celle d'une dune de sable sec, et nous voyons qu'elle est légèrement plus faible : 28° au lieu des 35° dans le cas de sable sec sur une surface sèche. Les grains de sable adhèrent donc moins bien entre eux lorsqu'ils sont noyés dans l'eau que lorsqu'ils sont secs. **On peut en déduire que l'eau permet la cohésion des grains de sable entre eux uniquement si ces grains de sable ne sont pas noyés dans l'eau.**

Une fois que la dune émerge de l'eau, si on continue de verser du sable, on commence alors à voir un monticule de pente plus raide, de pente 38° . Ce monticule peut se former car l'eau du récipient monte par capillarité entre les grains de sable. Figure 5. Puis un début de stalagmite se forme.



Figure 5 : En versant le sable dans l'eau, un monticule commence à émerger, avec une pente plus raide.

Cela dit, lors de ces premières expériences, nous n'avons pas obtenu de grandes stalagmites : sitôt formées, ces dernières se cassaient et le sable issu de leur destruction venait s'ajouter au tas de sable dans l'eau. Mais même si nous n'obtenions pas de belles stalagmites, nous avons pu voir à quel point le sable qui émergeait de l'eau consommait l'eau du cristallisateur. En effet, comme on le voit dans la vidéo que nous avons réalisée lors de nos expériences ([lien ici](#)), le fait d'ajouter du sable provoque un courant de l'eau vers le monticule.

Cette observation nous donne ainsi une piste pour étudier la formation des stalagmites, par le biais de l'eau absorbée par le sable.

A force de faire des stalagmites dans le cristallisateur, la quantité de sable dans l'eau est devenue telle que le dôme de sable situé sous la stalagmite émerge lui aussi de l'eau. On le voit sur la photo de droite (figure 6). On peut alors se douter que, pour que l'eau puisse parvenir en haut de la stalagmite, elle devra se frayer un chemin plus compliqué car elle devra traverser une quantité de sable plus importante. Or, comme vu dans le paragraphe précédent, l'eau doit être acheminée vers le haut de la stalagmite pour que les grains de sable puissent se lier les uns aux autres.

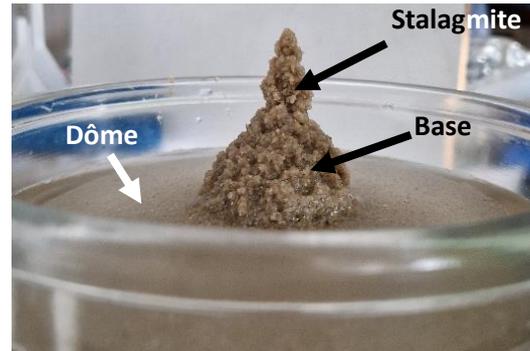


Figure 6 : l'interface eau/air est située dans le tas de sable et non au-dessus, ce qui complique l'acheminement de l'eau vers la stalagmite

Ce constat pointe alors un problème d'ordre expérimental : il nous faut imaginer un dispositif permettant de faciliter la circulation de l'eau vers le haut de la stalagmite.

Lors de ces expériences, nous avons donc deux situations expérimentales différentes en ce qui concerne la quantité d'eau à la base de la stalagmite :

- soit le dôme de sable sous la stalagmite était dans l'eau. Dans ce cas-là, la stalagmite se cassait systématiquement au niveau de sa base sans dépasser les 1 cm de hauteur
- soit le dôme de sable sous la stalagmite était hors de l'eau. Dans ce cas-là, la croissance de la stalagmite était très lente, et la taille de la stalagmite limitée.

Nous avons déduit de ces observations que le taux d'humidité à la base de la stalagmite sera un élément important à contrôler pour réaliser des grandes stalagmites.

Forts de ces observations, nous avons commencé par construire un dispositif expérimental permettant de réaliser des stalagmites en essayant de contrôler davantage l'ensemble des paramètres intervenant dans la formation de la stalagmite.

II – Quel dispositif expérimental peut-on confectionner pour réaliser de grandes stalagmites ?

1) Il faut contrôler le taux d'eau à la base de la stalagmite.

Nous en avons parlé dans la première partie : il faut à la fois contrôler la quantité d'eau à la base de la stalagmite, ce qu'on pourra appeler le taux d'humidité à la base de la stalagmite. Et il faut aussi faire en sorte que l'eau puisse arriver sans encombre vers la stalagmite en évitant qu'elle ait à traverser un dôme important de sable avant d'y parvenir.

Pour réussir à faire cela, nous avons imaginé le dispositif suivant (figure 7) – vidéo de l'expérience : <https://youtu.be/kiQMCWfhLAc>

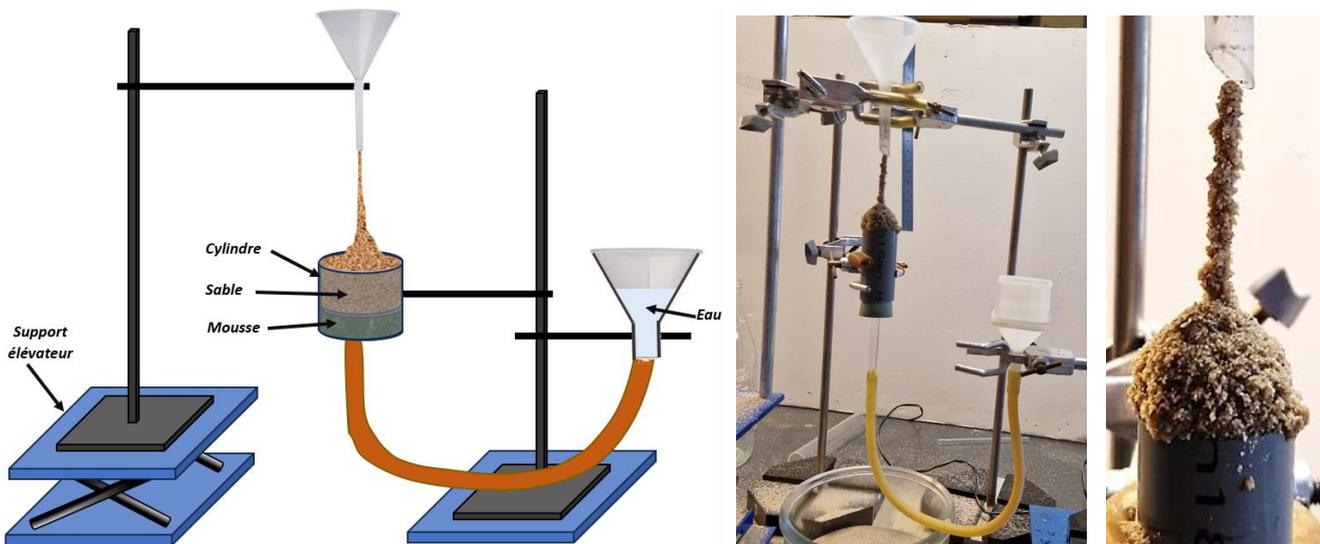


Figure 7 : Dispositif expérimental permettant de contrôler le tas de sable à la base de la stalagmite

Ce dispositif permet d'avoir une base qui reste de taille et de forme relativement constante au cours de la formation de la stalagmite, car le sable qui ne s'accroche pas à la stalagmite peut alors tomber sur la table et ne s'agglutine pas sur le cylindre.

D'autre part, il nous permet de contrôler l'humidité du sable à la base de la stalagmite : en levant ou baissant l'entonnoir de droite contenant l'eau, on peut amener l'eau à un certain niveau dans le sable contenu dans le cylindre, sur lequel se formera la stalagmite. On peut également ajouter de l'eau dans l'entonnoir pour compenser l'eau absorbée par le sable de la stalagmite lors de sa formation.

Pourquoi verser le sable à partir d'un entonnoir disposé sur un support élévateur de hauteur réglable ?

Pour deux raisons :

- D'une part l'entonnoir nous permet de disposer d'un filet le plus fin possible de sable
- D'autre part car nous voulions voir l'influence de la hauteur de chute sur la formation de la stalagmite. Et comme nous souhaitons maîtriser l'ensemble des paramètres qui participent à la formation de la stalagmite, nous avons pris le temps de développer ce point dans le paragraphe suivant.

2) La hauteur de chute des grains de sable est-elle un paramètre influent ?

Nous avons voulu savoir si la hauteur, et donc la vitesse de chute des grains de sable était un paramètre qui intervenait dans la formation de la stalagmite. Nous avons alors versé du sable via un entonnoir situé à une distance de 56,5 cm de la surface de l'eau dans un premier temps, puis situé à 24,5 cm de la surface de l'eau dans un second temps. Les deux expériences montrent des résultats très similaires. La vitesse de chute ne semble donc pas représenter un paramètre important dans la formation de la stalagmite. Cela dit, peut-être que nous concluons trop vite. Il se pourrait en effet que la vitesse du grain de sable au moment de l'impact soit identique malgré les hauteurs initiales différentes, du fait de frottements du grain avec l'air lors de sa chute. Nous avons alors voulu savoir si c'était le cas en menant une approche expérimentale :

Pour cela nous avons réalisé le dispositif suivant : figure 8 – vidéo de l'expérience :

<https://youtu.be/kEJYc58uxGo>

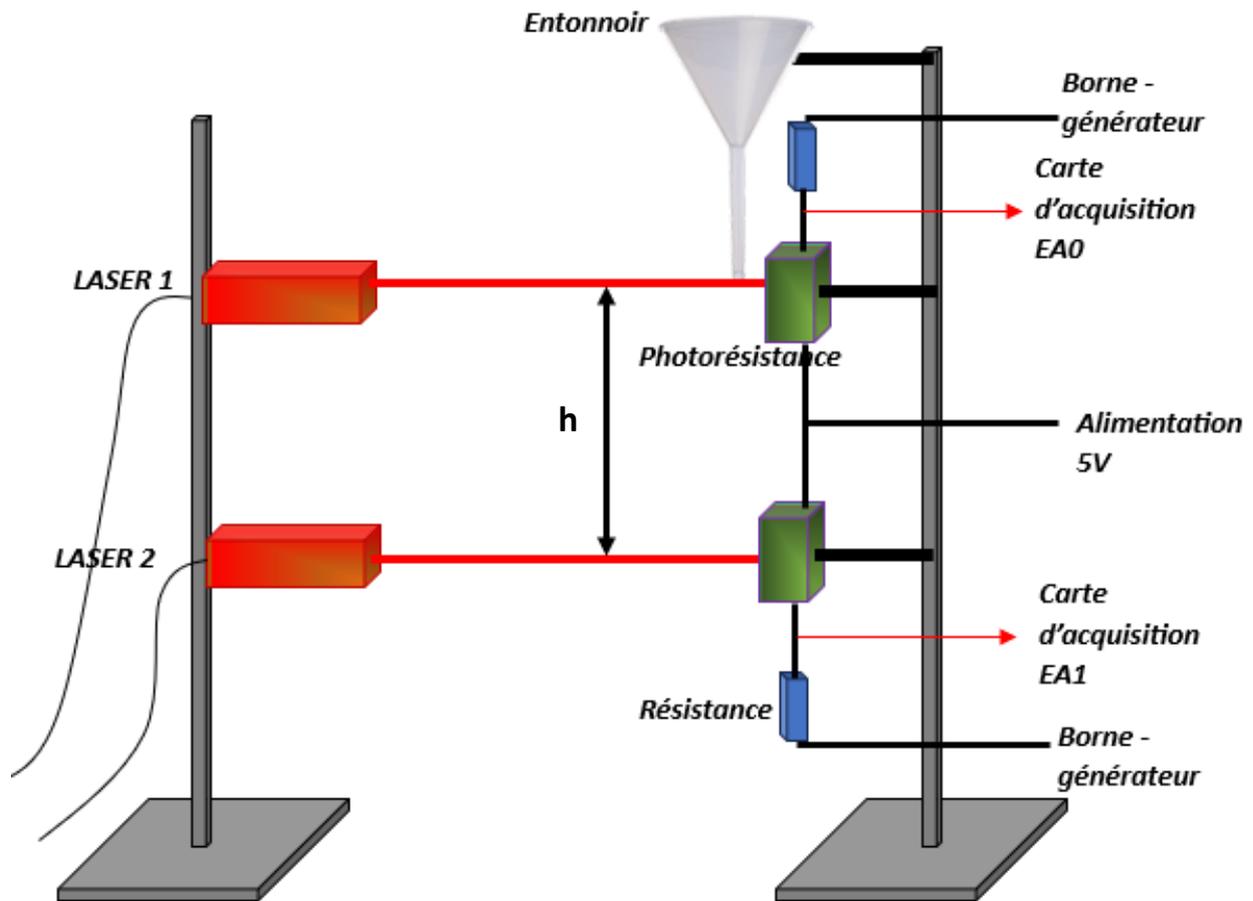


Figure 8 : Dispositif expérimental permettant de mesurer la vitesse des grains à une altitude donnée, pour vérifier l'étude théorique précédente

Dans l'entonnoir, nous avons déposé du sable. L'extrémité basse de l'entonnoir, positionnée sur la ligne de visée du laser 1, est fermée par un papier cartonné. A un instant donné, on ouvre l'entonnoir. Le sable coupe alors successivement les faisceaux lasers 1 et 2, ce qui nous permet d'en déduire la durée nécessaire pour que le sable parcoure la distance h . Nous avons pu réaliser 3 mesures et avons positionné les résultats dans le graphique ci-dessous. (figure 9).

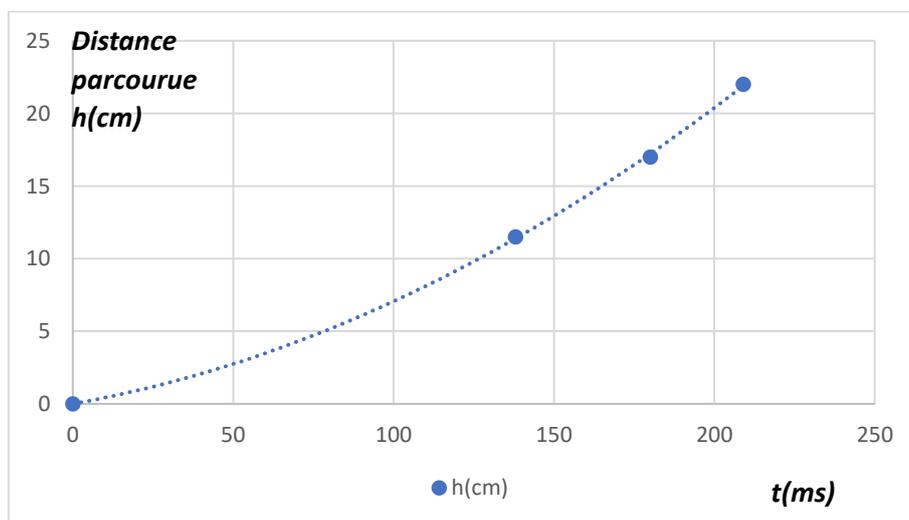


Figure 9 : Durée t nécessaire (en abscisse) pour que le sable parcoure une distance h (en ordonnée)

Le fait que la distance h parcourue ne soit pas proportionnelle au temps montre qu'il y a bien une accélération des grains de sable au cours de leur chute, même après 25 cm de chute. Les grains de sable n'atteignent donc pas leur vitesse limite du fait de frottements avec l'air. Ainsi, on peut affirmer que lorsque nous formons des stalagmites au cours de nos expériences, la vitesse à laquelle les grains de sable tombent ne sera pas un facteur important. Cela dit, nous pouvons remarquer que le filet de sable sortant de l'entonnoir a tendance à devenir plus large au cours de la chute du sable. Nous faisons alors le choix d'ajuster en temps réel la hauteur du support élévateur de sorte que l'extrémité basse de l'entonnoir soit au plus proche de la stalagmite.

Remarque : nous avons comparé en annexe les résultats de la figure 9 obtenus expérimentalement, à ceux qu'on doit obtenir en considérant que la chute des grains de sable se fait sans frottement. Nous avons alors constaté qu'en réalité, compte tenu des hauteurs de chute avec lesquelles nous travaillons, les frottements avec l'air sont tout simplement négligeables.

Voyons maintenant comment verser les grains de sable.

3) Comment verser le sable ?

Nous avons versé le sable de différentes manières :

- Via des entonnoirs de différents diamètres,
- Sans entonnoir
- Avec un débit constant
- Par à-coups

Il n'a pas été très évident de voir des différences flagrantes sur les stalagmites obtenues, mis à part lorsqu'on verse le sable sans entonnoir. Dans ce dernier cas, il était difficile d'obtenir une stalagmite plus grande qu'un 1 cm alors que dans les autres cas, les hauteurs de stalagmites étaient généralement d'environ 4 cm de hauteur.

L'expérience a tout de même montré qu'un débit assez lent, voire par à-coups, était l'idéal pour obtenir des stalagmites d'environ 8 cm de hauteur. Précisons que ce qu'on appelle la hauteur de la stalagmite correspond à la mesure qui part du haut de la base, et qui se termine à la pointe de la stalagmite. On ne tient pas compte de la base de la stalagmite dans la mesure de la hauteur.

Pour verser le sable, nous avons alors disposé une rampe inclinée dont l'extrémité basse verse le sable dans l'entonnoir, et l'extrémité haute repose sur un support sur lequel on a également disposé une membrane vibrante. La membrane vibrante donne des secousses à répétition sur le support, permettant au sable de tomber par à-coups (figure 10).

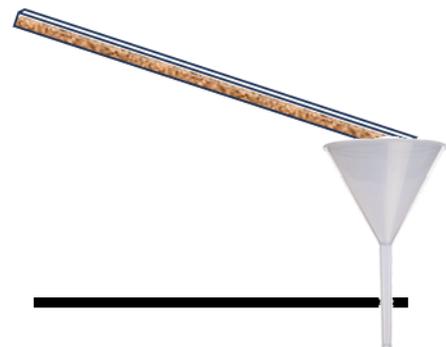


Figure 10 : complément du dispositif pour verser le sable dans l'entonnoir, au moyen d'une membrane vibrante

Nous ne parlons volontairement pas du débit du sable ici, car cela fera l'objet d'un paragraphe dans la suite de ce mémoire.

Maintenant que nous avons fait le tour des choix expérimentaux liés aux paramètres qui interviennent dans la formation de la stalagmite, essayons de réfléchir à la meilleure façon d'obtenir une grande stalagmite.

Nous nous sommes particulièrement intéressés au débit du sable et au taux d'humidité dans la stalagmite.

III – Débit du sable et taux d'humidité : un couple à gérer !

1 - La vitesse maximale de croissance de la stalagmite est-elle limitée ?

Le débit du sable étant lié à la vitesse à laquelle on le verse, nous allons commencer par parler de vitesse.

Il est clair que la vitesse de croissance de la stalagmite peut prendre un temps infini puisque le débit avec lequel on verse du sable peut être aussi faible que l'on veut. Comme nous cherchons la vitesse de croissance maximale, nous avons versé du sable en continu de sorte que le débit de sable ne soit pas la cause de la limitation de la vitesse de croissance de la stalagmite (vidéo : https://youtu.be/B_YXY5GoYH0) et nous avons filmé les stalagmites formées afin de connaître la vitesse maximale de croissance d'une stalagmite : figure 11.

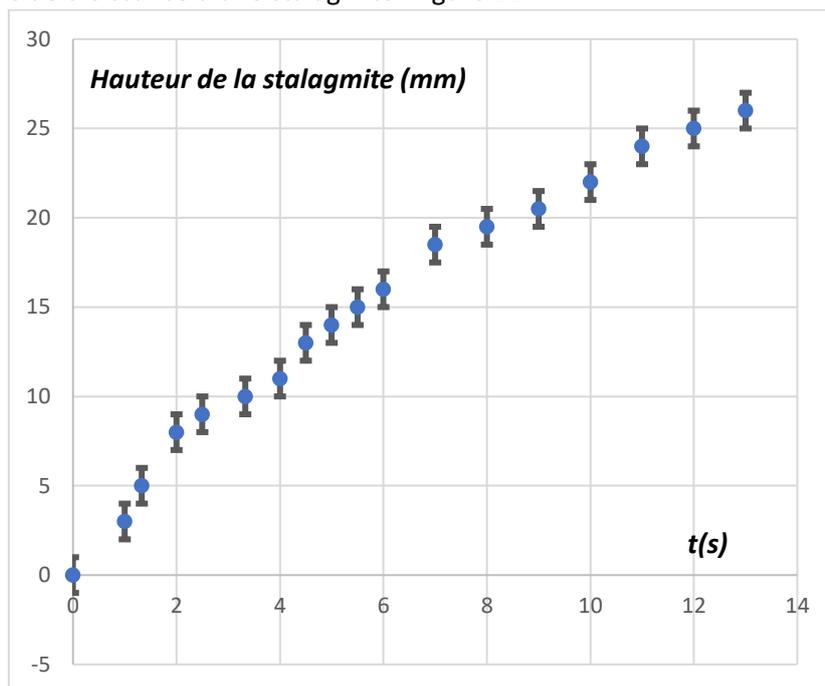


Figure 11 : Evolution de la hauteur de la stalagmite en fonction du temps, en versant le sable en continu : la stalagmite croît de plus en plus lentement au fur et à mesure qu'elle grandit

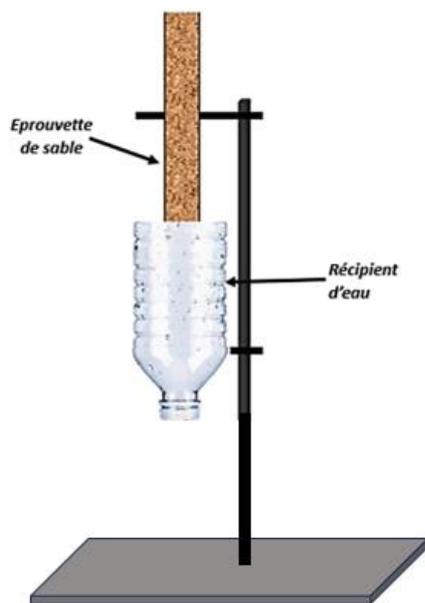
Nous pouvons ainsi remarquer que la hauteur de la stalagmite croît de moins en moins vite au cours du temps. Donc la vitesse de croissance diminue.

Pourquoi la vitesse évolue-t-elle ainsi ?

Ce que nous pouvons déjà dire pour répondre à cette question, c'est que l'eau ne peut monter par capillarité dans la stalagmite que si des grains viennent se déposer sur le dessus de la stalagmite. Alors ces grains tiendront grâce aux forces de tension superficielle.

Et comme l'eau ne monte pas instantanément par capillarité, la croissance de la stalagmite ne doit pas se faire plus rapidement que la montée de l'eau par capillarité dans le sable. Il serait d'ailleurs intéressant de savoir à quelle vitesse l'eau peut monter par capillarité dans une colonne de sable, pour comparer cette vitesse à celle à laquelle la stalagmite croît au cours du temps.

C'est ce que nous avons fait :



Nous avons pris un tube transparent ouvert à ses 2 extrémités. Nous avons fermé l'extrémité inférieure avec de la gaze et nous avons alors rempli le tube de sable. Nous avons par ailleurs disposé une bouteille d'eau coupée et bouchée que nous avons rempli à ras bord. Nous avons alors disposé le tube de sable de sorte que son extrémité inférieure soit à fleur d'eau. figure 12.

Vidéo de l'expérience : <https://youtu.be/g2mJlf5poPE>

Dès lors, nous arrivons à voir l'eau monter dans le tube : le sable mouillé devient en effet plus foncé que le sable sec. Nous avons alors pu noter l'évolution de la hauteur de l'eau dans le tube en fonction du temps.

Voici les résultats obtenus : figure 13

Figure 12 : Expérience permettant de mesurer la distance parcourue par le front d'eau en fonction du temps

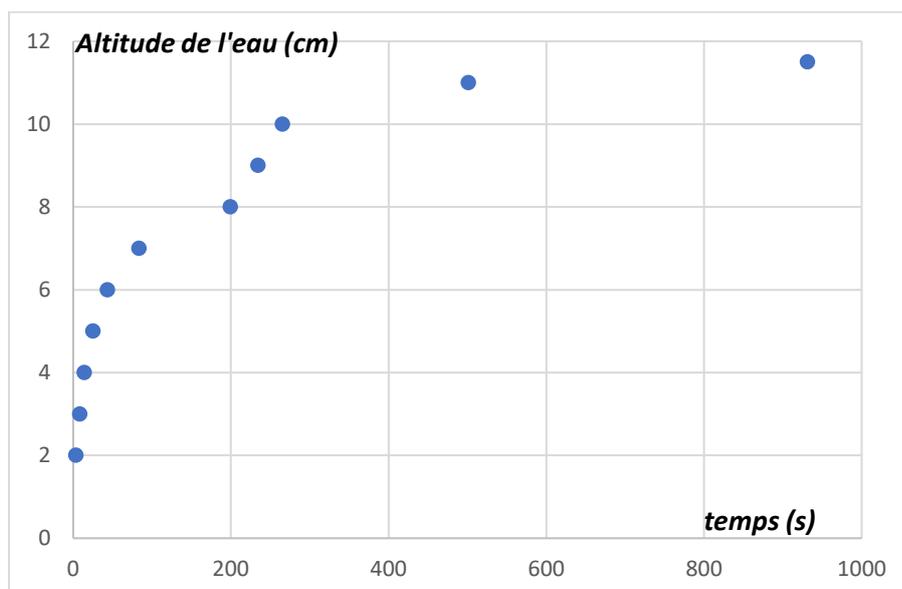


Figure 13 : Altitude atteinte par le front d'eau dans le tube de sable en fonction du temps

Comparons alors la hauteur de la stalagmite au cours du temps (obtenue avec une vitesse de croissance maximale), et la hauteur à laquelle l'eau peut monter dans une colonne de sable (figure 14). Comme les stalagmites formées dans ces conditions extrêmes mesureraient environ 3 cm de hauteur, la comparaison portera uniquement sur le début de la courbe présentée figure 13 :

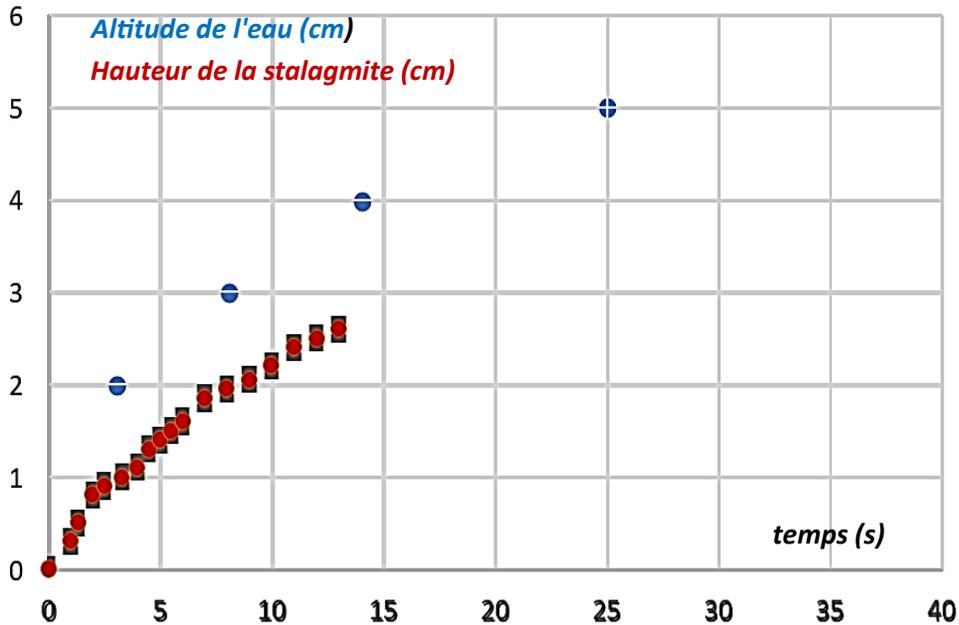


Figure 14 : Comparaison entre la hauteur de la stalagmite au cours du temps et la hauteur à laquelle l'eau peut monter dans une colonne de sable au cours du temps.

Nous aurions pu superposer à ces deux courbes celle montrant l'évolution théorique de la hauteur de la stalagmite si tout le sable versé avec l'entonnoir utilisé s'accrochait en haut de la stalagmite.

Pour obtenir cette courbe théorique, nous avons tout d'abord mesuré le débit du sable versé et nous avons trouvé qu'il faut 23 secondes pour remplir une éprouvette de 20 mL de sable, ce qui correspond à un débit D volumique égale à $D = 0,87 \frac{mL}{s}$. Ce débit étant constant, $D = \frac{V}{\Delta t}$, où V est le volume de sable versé au bout d'un temps Δt et S la surface de la base de la stalagmite ($S = \pi R^2$), on en déduit que

$$z = \frac{D}{\pi R^2} t$$

z évoluerait théoriquement linéairement avec une pente (et donc une vitesse) $\frac{D}{\pi R^2} = \frac{0,87 \cdot 10^{-6}}{\pi(2,5 \cdot 10^{-3})^2} = 0,4 \text{ m/s}$. Nous sommes bien loin d'avoir cette évolution théorique.

Revenons sur les deux courbes figure 14. Ces deux courbes sont cohérentes, car il aurait été improbable de voir la hauteur de la stalagmite évoluer plus rapidement que la hauteur à laquelle l'eau peut monter par capillarité dans le sable. Analysons ces courbes de plus près.

La comparaison montre que la vitesse de croissance de la stalagmite est plus faible que la vitesse à laquelle l'eau monte dans la colonne de sable. Donc la stalagmite ne croît pas aussi vite qu'elle le pourrait puisque l'eau monte plus vite dans la colonne de sable que la hauteur de la stalagmite augmente. Pour préciser davantage, les deux évolutions sont rapides au début, puis ralentissent au cours du temps. Cela dit, et pour aller plus loin, il est intéressant de noter que la différence entre les 2 évolutions augmente au cours du temps. Autrement dit, plus la stalagmite grandit, et plus la proportion des grains de sable versés qui s'accrochent sur la stalagmite est faible.

Pourquoi une telle différence ? Qu'est ce qui change au cours du temps et qui pourrait être responsable de l'évolution de cette différence ?

Est-ce que la façon dont l'eau est acheminée du bas vers le haut de la stalagmite est la même que la façon dont l'eau monte dans une colonne de sable déjà en place ? Nous savons que dans les deux cas, l'eau monte par capillarité. Mais dans le cas de la stalagmite, le fait que les grains s'agglutinent au fur et à mesure peut engendrer des différences dans la manière qu'a l'eau de se déplacer, en comparaison à la façon dont elle se déplace dans une colonne de sable déjà en place. Dans ce cas-là, si l'eau ne se comporte pas de la même manière dans la stalagmite et dans la colonne de sable, on devrait voir des différences en termes d'humidité au sein de la stalagmite, et au sein de la colonne de sable. Nous avons voulu vérifier cette hypothèse en réalisant de nouvelles expériences. Nous avons commencé par chercher à mesurer le taux d'humidité dans une stalagmite, et nous avons voulu comparer ce taux à celui dans une colonne de sable.

2 - Quel est le taux d'humidité dans une stalagmite et dans une colonne de sable ?

Taux d'humidité dans une stalagmite

Pour mesurer le taux d'humidité en fonction de la hauteur dans une stalagmite, nous en avons réalisé une, et après avoir atteint une hauteur d'environ 8 cm, nous l'avons récupérée et l'avons découpée en tranches selon sa hauteur.

Chaque tranche a ensuite été déposée sur une feuille de papier aluminium, et nous avons alors pesé chaque tranche de sable au dix millième de gramme près. Puis les tas de sable ont été déposés dans une étuve pendant 2h pour sécher le sable. Enfin, nous avons à nouveau pesé le sable sec sur les feuilles de papier aluminium. Toutes ces pesées nous ont permis de déterminer la masse d'eau, et la masse de sable sec dans chaque tranche de la stalagmite. Nous avons alors pu calculer le taux d'humidité pour chaque tas, ce qui a abouti au graphique suivant qui montre le taux d'humidité dans la stalagmite en fonction de la hauteur.

Voici donc les résultats obtenus : figure 15

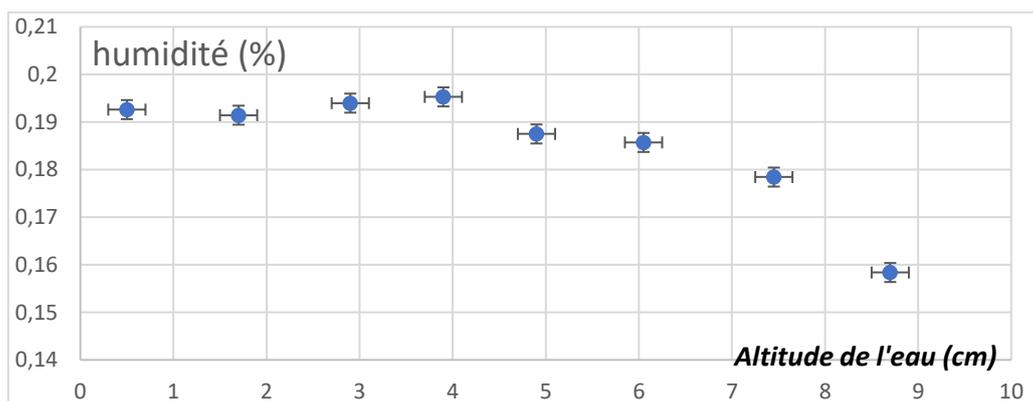


Figure 15 : % massique d'eau en fonction de la hauteur dans la stalagmite

Les résultats montrent une réelle décroissance de l'humidité en fonction de la hauteur. Cela dit, cette décroissance n'intervient que pour des hauteurs supérieures à 5 cm.

Précisons tout de même que la durée de l'expérience (découpe de la stalagmite, répartition dans différents papiers aluminium, descente d'un étage pour aller peser avec la balance de SVT précise au dix-millième de gramme près) est très longue, et il est possible que l'humidité de chaque couche ait un peu varié entre le moment où le sable était dans la stalagmite, et le moment où il s'est retrouvé sur la balance.

Taux d'humidité dans une colonne de sable

Voyons maintenant le taux d'humidité dans une colonne de sable déjà en place après que l'eau soit montée par capillarité dans cette colonne. Pour cela, nous avons utilisé le même tube que lors du paragraphe page 10. Nous avons à nouveau mis du sable dans ce tube que nous avons ensuite mis à fleur d'eau. Une fois l'eau montée par capillarité sur une hauteur de 13 cm, nous avons retiré le sable du tube. Nous avons alors découpé ce boudin de sable en tranches et nous avons pesé chacune de ces tranches. Puis nous les avons séchées à l'étuve avant de peser à nouveau les tranches de sable sec. Nous avons alors pu obtenir le taux d'humidité du sable en fonction de la hauteur à laquelle il se trouve dans la colonne. Voici les résultats obtenus : Figure 16.

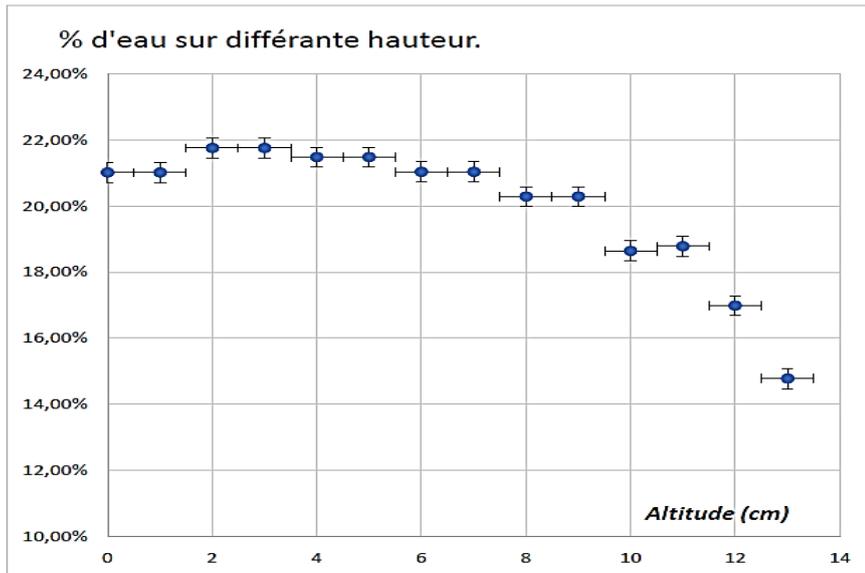


Figure 16 : % massique d'eau en fonction de la hauteur dans la colonne de sable

Nous constatons que le taux d'humidité est à peu près constant durant les 7 premiers cm avant d'amorcer une chute importante.

Comparons alors sur un même graphique les deux évolutions précédentes : figure 17

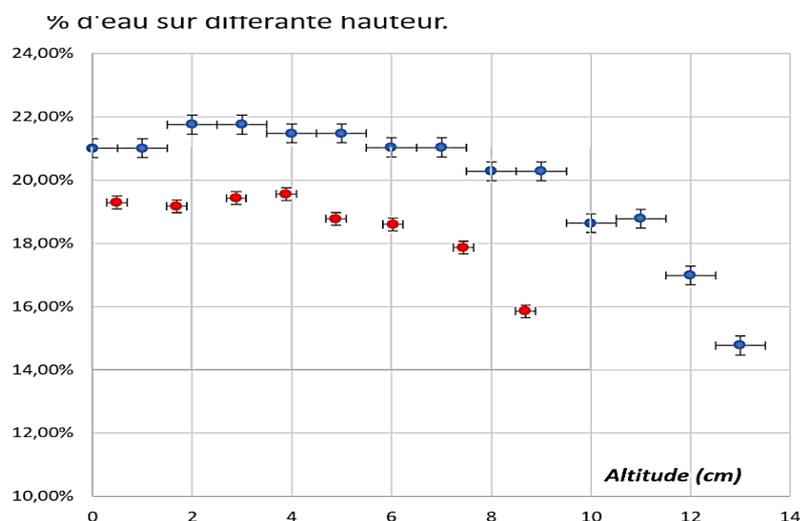


Figure 17 : Comparaison des % massiques d'eau en fonction de la hauteur dans la colonne de sable (en bleu) et dans la stalagmite (en rouge).

L'hypothèse formulée en bas de la page 11 semble donc confirmée : on voit nettement une différence entre ces deux évolutions. La différence est aussi bien en termes de taux d'humidité qu'en termes d'altitude à partir desquelles ces taux d'humidité décroissent. En effet, nous pouvons noter que le taux d'humidité décroît dès 4 cm dans la stalagmite alors qu'elle ne décroît qu'au bout de 7 cm dans la colonne de sable.

Pourquoi de telles différences ?

Il est possible que ces différences soient issues d'une organisation différente des grains de sable dans la stalagmite comparée à celle que l'on a dans une colonne de sable déjà en place. Si tel est le cas, on constate alors que l'organisation des grains dans la stalagmite ne permet pas d'absorber autant d'eau par capillarité que ne le fait la colonne de sable. Cela a forcément une conséquence sur la façon dont croît la stalagmite. Mais est-ce que cela a une conséquence sur sa stabilité ? C'est une question à laquelle nous chercherons à répondre par la suite. Toujours est-il que l'organisation des grains pourrait alors être un paramètre intéressant à maîtriser pour réaliser une stalagmite, mais il nous semble difficile de le contrôler. Sauf si... Nous en parlerons dans une prochaine partie.

Il est possible aussi que la montée de l'eau dans la stalagmite se fasse par à-coups, au rythme de la chute des grains de sable, ce qui engendrerait des problèmes d'inertie au niveau de la montée de l'eau.

On peut enfin imaginer qu'en tombant sur la stalagmite, le choc du sable sur la stalagmite se répercute au niveau de l'eau et ralentisse alors sa montée. Cela dit, nous nous efforçons de placer l'entonnoir de sable au plus proche du haut de la stalagmite, donc il n'est pas évident que cet effet soit présent.

En attendant, si on fait le point sur les deux dernières expériences, on peut dire que non seulement l'eau monte plus vite dans une colonne de sable que dans la stalagmite, mais en plus le taux d'humidité en fonction de la hauteur y est plus important.

Ces expériences qui portent sur le taux d'humidité dans la stalagmite posent question. En effet, la stalagmite grandit rapidement au début, lentement à la fin. La fin correspond au moment où la stalagmite se casse. Si on récupère la stalagmite avant qu'elle ne se casse, on voit un taux d'humidité fort en bas, et plus faible en haut. Et alors que la stalagmite a du mal à croître au-dessus d'une certaine hauteur, c'est toujours en bas qu'elle se casse.

Pourquoi finit-elle par se casser en bas ? Est-ce qu'elle se casse parce que le taux d'humidité en bas évolue au cours de la formation de la stalagmite ? Est-ce que c'est dû à la masse de la stalagmite qui ne cesse d'augmenter ? Pour savoir si le taux d'humidité en bas de la stalagmite évolue au cours du temps, nous avons réalisé 2 expériences différentes :

3 - Comment évolue la masse d'eau absorbée par capillarité par le sable au cours du temps ?

Méthode 1 :

Pour répondre à cette question, nous avons assimilé la stalagmite à une colonne de sable, et nous avons cherché à mesurer la masse d'eau absorbée par une colonne de sable au cours du temps, et nous l'avons comparée à la hauteur atteinte par l'eau dans la colonne de sable au cours du temps.

Pour cela, nous avons imaginé le dispositif expérimental suivant :

a – Dispositif expérimental :

Nous avons voulu réaliser une expérience au cours de laquelle nous pouvions mesurer à la fois :

- La hauteur de l'eau dans la colonne
- Le volume d'eau absorbé par le sable au cours du temps

L'idée était dans un premier temps de disposer le tube de sable dans un récipient à peine plus étroit que le tube, de façon à voir l'eau du récipient descendre au cours du temps. En effet, nous avons essayé avec un récipient plus large, et la quantité d'eau absorbée par capillarité dans le sable est tellement faible que nous ne voyions pas l'eau descendre.

Le problème avec le récipient plus étroit est que comme le niveau de l'eau descend dans le récipient, l'extrémité basse du tube de sable n'est plus immergée de la même hauteur dans l'eau. On aurait alors pu descendre le tube au fur et à mesure que l'eau descend dans le récipient, mais cela n'aurait pas été très précis. Alors nous avons cherché un dispositif qui pouvait répondre à nos attentes et nous avons imaginé celui-ci : figure 18

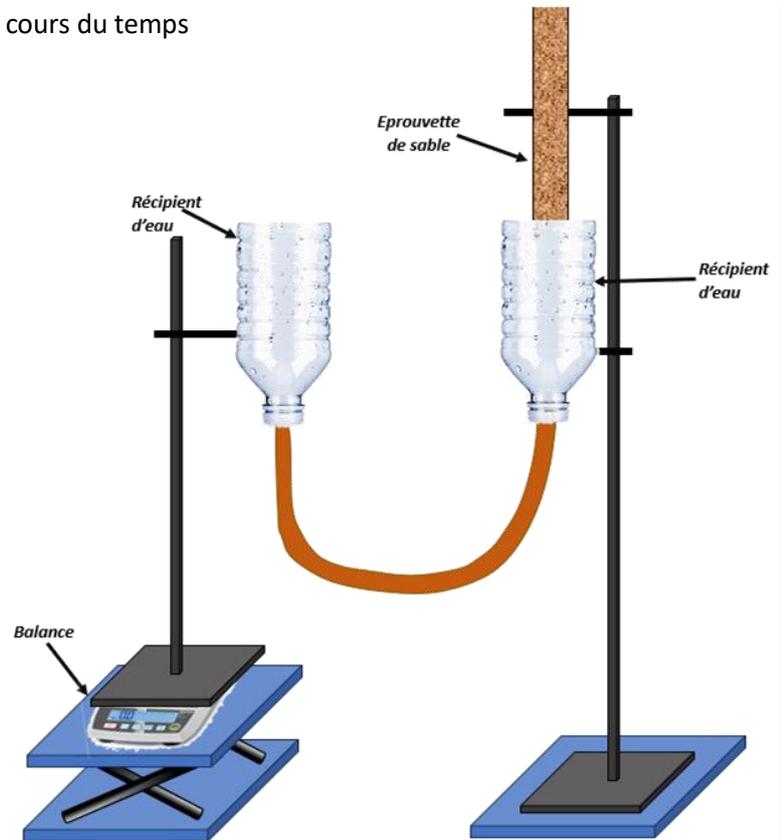


Figure 18 : Dispositif expérimental permettant d'étudier l'absorption de l'eau par une colonne de sable

Vidéo de l'expérience : en vitesse normale : <https://youtu.be/Lhz4dQgoOeA>

Vidéo de l'expérience : en vitesse accélérée : <https://youtu.be/DHqsG672zIU>

Le tube de sable est une éprouvette que nous avons coupée à la base pour qu'elle soit ouverte aux deux extrémités.

Nous avons fermé l'extrémité basse avec de la gaze tenue par un élastique de façon à pouvoir remplir le tube de sable sans qu'il ne puisse tomber, tout en permettant à l'eau de monter sans obstacle par capillarité dans la colonne de sable. Le tube est plongé dans l'eau, sur une hauteur d'à peine environ 2 mm. Le récipient est suffisamment large pour que le niveau de l'eau n'y varie pratiquement pas. D'autant plus que ce récipient est relié par un siphon au récipient de gauche. De ce fait, lorsqu'un volume V d'eau est absorbé par le sable, un volume $V/2$ d'eau transite du récipient de gauche au récipient de droite pour ajuster les 2 niveaux. Cela nous permet de mesurer la masse d'eau absorbée par le sable.

D'autre part, comme nous filmons l'expérience, nous pouvons connaître la hauteur d'eau qui est montée par capillarité dans le tube, ainsi que la masse d'eau absorbée à chaque instant grâce à la balance disposée sous le récipient de gauche.

Voyons alors les résultats obtenus : figure 19

b - Masse d'eau absorbée au cours du temps :

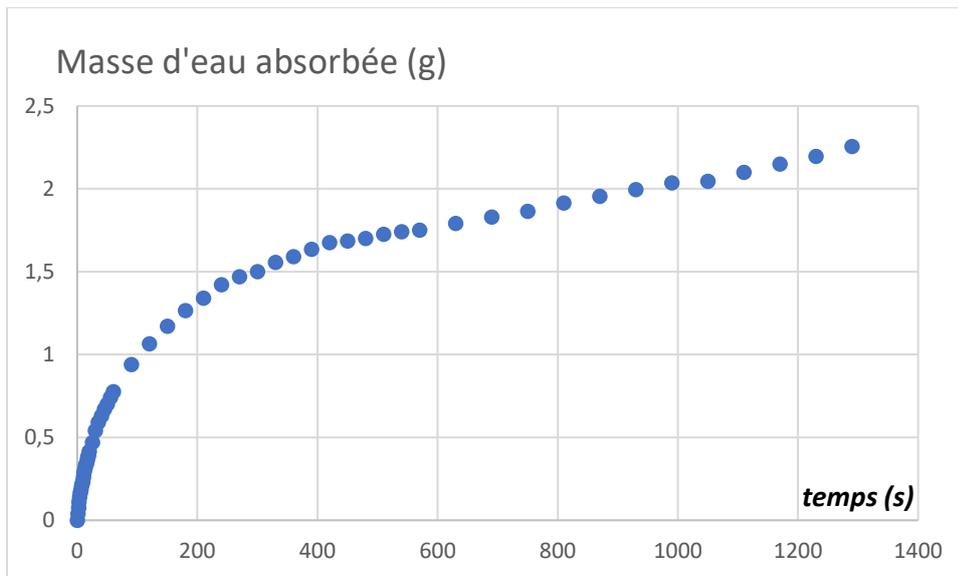


Figure 19 : masse d'eau absorbée par la colonne de sable en fonction du temps

Nous avons alors voulu comparer cette évolution à celle de la hauteur d'eau dans la colonne, pour avoir une idée de la façon dont l'eau se répartit au cours du temps dans la colonne : figure 20.

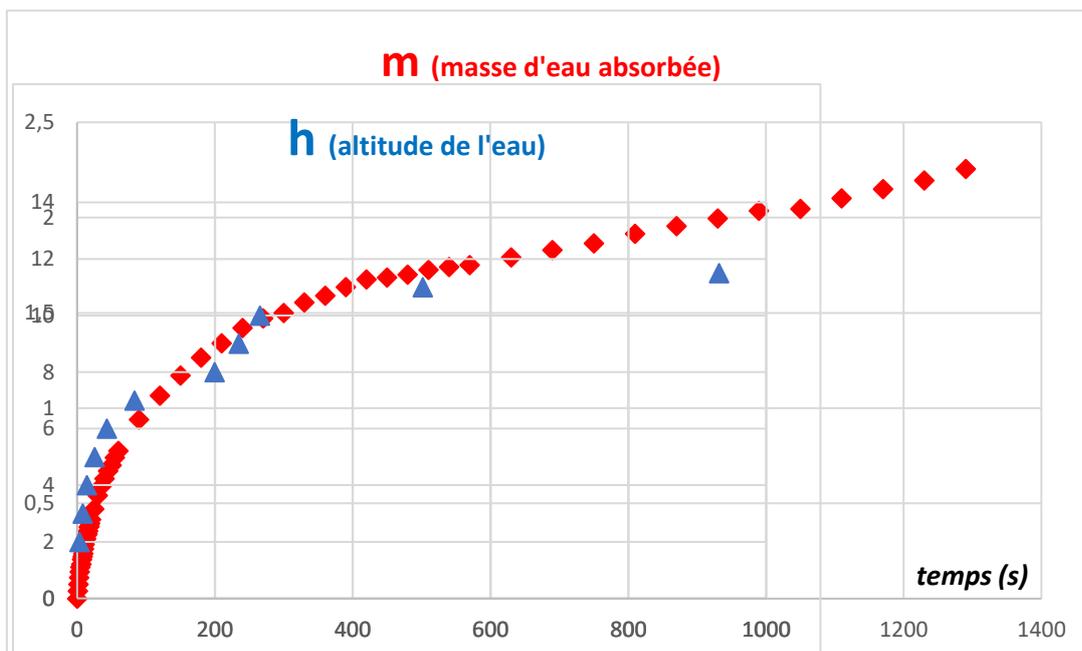


Figure 20 : comparaison de la masse d'eau absorbée au cours du temps (en rouge) et la hauteur à laquelle l'eau monte au cours du temps (en bleu) dans la colonne de sable.

En superposant les deux courbes de sorte à faire coïncider le temps, on peut voir que, dans les 100 premières secondes, la hauteur d'eau dans le tube monte rapidement par rapport à la masse d'eau consommée. Par contre, au-delà de 600 secondes environ, la hauteur d'eau se stabilise alors que de l'eau est encore absorbée par la colonne de sable. Cela montre que lorsque l'eau monte par capillarité dans la colonne, elle n'occupe pas tout l'espace disponible dans un premier temps. Et au cours du

temps, l'eau doit trouver tous les chemins possibles entre les grains pour finalement occuper le plus d'espace disponible.

Méthode 2 :

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons refait l'expérience en l'arrêtant au bout de trois durées différentes :

Expérience 1 : arrêt au bout de 6 secondes

Expérience 2 : arrêt au bout de 15 minutes

Expérience 3 : arrêt au bout de 12 heures

Dès l'instant où on arrêta l'expérience, on enlevait rapidement le tube de sable, et on prélevait le sable sur une hauteur de 1 cm situé au niveau de la base de la colonne (en jetant le 5 premiers millimètres pour ne pas prélever le sable qui pouvait se trouver sous la surface de l'eau au moment de l'expérience). On pesait alors le sable humide, puis on le faisait sécher dans l'étuve avant de le peser à nouveau pour en déduire la masse d'eau qu'il contenait. Cela nous a permis d'en déduire le taux massique d'eau dans le sable humide. Voici les résultats :

	<i>Expérience 1</i>	<i>Expérience 2</i>	<i>Expérience 3</i>
Masse sable mouillé	5,0780	4,6469	3,7633
Masse sable sec	4,0724	3,6666	2,9655
Taux d'eau	19,8%	21,1%	21,2%

Il y a des différences, même si elles sont relativement faibles. Et ces différences sont complètement cohérentes avec l'interprétation des mesures précédentes.

Quelles conclusions peut-on tirer de ces mesures en ce qui concerne la stalagmite ?

En l'état, on pourrait dire que l'eau occupe plus d'espace disponible à sa base si on la laisse 15 minutes que si on la laisse quelques secondes, ce qui peut être intéressant à savoir. En effet, si on transpose cela à la stalagmite, on se rend alors compte que l'humidité de la base de la stalagmite varie au cours de la formation de celle-ci.

Or il est possible qu'il y ait une humidité optimale pour assurer la meilleure cohésion entre les grains de sable. Voyons maintenant cela :

4 – Quel doit être le taux d'humidité optimal pour réaliser une stalagmite ?

a – Faisons varier la quantité d'eau à la base de la stalagmite

Nous avons utilisé le dispositif expérimental présenté figure 7 dans lequel nous avons fait varier la hauteur de l'entonnoir contenant l'eau de sorte que le niveau de l'eau dans l'entonnoir soit :

- au-dessus de la base de la stalagmite
- au même niveau que la base de la stalagmite
- en dessous de la base de la stalagmite (rappelons que même dans ce cas, de l'eau arrive au niveau de la base de la stalagmite du fait de la présence de mousse dans le cylindre)

Dans ces trois conditions expérimentales, nous avons cherché à former des stalagmites.

Nous avons alors réalisé 10 stalagmites dans chacune de ces conditions et avons noté la valeur moyenne de leur hauteur.

Pour information, nous avons mesuré le taux d'humidité de la base de la stalagmite pour ces trois conditions de travail en pesant la masse du sable mouillé situé dans le monticule à la base de la stalagmite et en le comparant à la masse du même sable séché à l'étuve. Tous les résultats sont répertoriés dans le tableau suivant :

	<i>Base très humide</i>	<i>Base humide</i>	<i>Base moins humide</i>
<i>Taux d'humidité de la base (%)</i>	23	20	20
<i>Hauteur moyenne des stalagmites (cm)</i>	2,3 ± 0,8	3,3 ± 0,7	3,3 ± 0,7

Nous constatons qu'il y a une réelle différence entre les hauteurs de stalagmites lorsque la base est humide : la stalagmite se casse plus rapidement, et ce, au niveau de sa base.

b – Un taux d'humidité de 20 % est-il optimal pour réaliser une grande stalagmite ?

Nous avons voulu savoir si les taux d'humidité que nous avons dans les stalagmites étaient des taux qui pouvaient assurer une grande cohésion du sable.

Pour cela, nous avons réalisé des mélanges de sable sec et d'eau dans différentes proportions, de sorte à disposer de sable ayant différents taux d'humidité. Avec chacun de ces sables humides, nous avons confectionné des petits tas de sable de forme cylindrique, tous identiques, en utilisant un moule. Nous avons alors déposé des masses croissantes sur chaque tas et avons noté pour quelle masse les tas cylindriques s'affaissaient (figure 21)

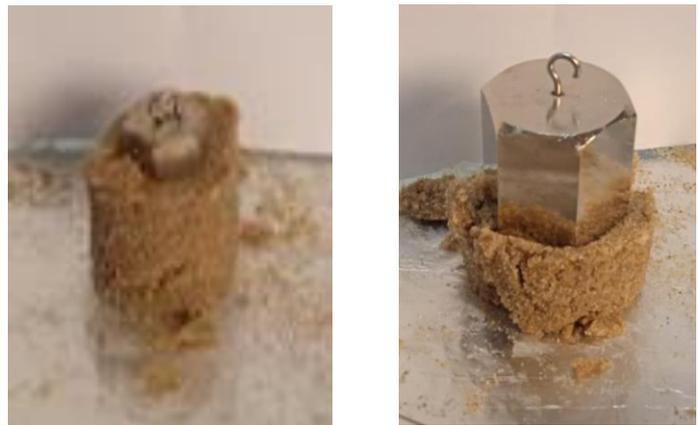


Figure 21 : Etude de la résistance d'un tas de sable avec une humidité donnée en déposant une masse dessus

Voici alors les résultats obtenus : figure 22

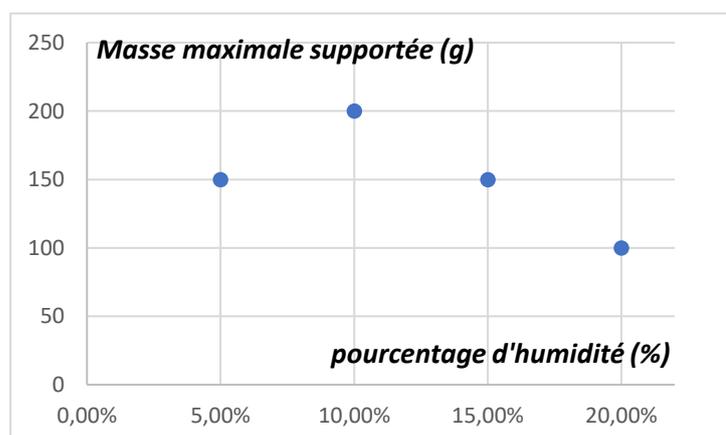


Figure 22 : cohésion du tas de sable en fonction de son taux d'humidité

Ces résultats indiquent que la meilleure cohésion entre les grains se trouve pour un mélange contenant 10% de masse d'eau. Ils montrent donc finalement que quelle que soit la hauteur à laquelle on se trouve dans la stalagmite, l'eau contenue dans la stalagmite est dans une proportion qui n'est pas la plus idéale pour assurer la stabilité de la stalagmite en terme de cohésion entre les grains de sable. Et cela est d'autant plus vrai en bas de la stalagmite.

Toutes nos expériences nous permettent donc de prouver rigoureusement que la stalagmite se casse en bas car c'est à cet endroit que le taux d'eau est le plus important, et en plus ce taux peut croître au fur et à mesure que la stalagmite grandit. Comme alors sa masse augmente, la stalagmite se casse là où elle est la plus fragile.

Conclusion, pour réaliser une grande stalagmite, nous pensons qu'il faut gérer en temps réel l'arrivée de l'eau au niveau de la base de la stalagmite.

5 - Une remarque pour finir sur cette partie qui aborde le taux d'humidité dans la stalagmite :

Nous avons également voulu comparer l'humidité de la base de la stalagmite par rapport à l'humidité maximale que l'on aurait pu avoir si l'eau avait occupé tout l'espace disponible. Pour connaître l'humidité maximale, nous avons tout simplement versé du sable dans une éprouvette contenant un volume d'eau connu, jusqu'à ce que le sable arrive à fleur d'eau. Connaissant la masse de sable versé et le volume d'eau, nous avons pu mesurer le taux d'humidité maximal du sable. Nous avons trouvé un taux de 25%. Lorsque ce taux est atteint, on peut alors dire que tous les espaces entre les grains de sable sont remplis d'eau.

Jusqu'à présent, nous avons fait varier des paramètres extérieurs pour étudier la formation des stalagmites : l'arrivée d'eau pour gérer l'humidité, la hauteur de chute du sable (qui finalement n'est pas si importante que cela). Que se passe-t-il maintenant si on modifie les grains de sable eux-mêmes ?

V – Quelle différence obtient-t-on si l'on utilise d'autres types de grains ?

1) Utilisation de billes de verre

Nous disposons de billes de verre sphériques de diamètre compris entre 90µm et 250µm. Ces billes sont tellement petites qu'il s'agit de poudre de verre sphérique (figure 23).

Nous avons voulu savoir s'il était possible de réaliser des stalagmites avec de tels objets pour savoir si la forme découpée des grains de sable était nécessaire à la réalisation d'une stalagmite.

De plus, le sable et le verre étant de la silice, cela a permis de manipuler des matériaux de compositions voisines.

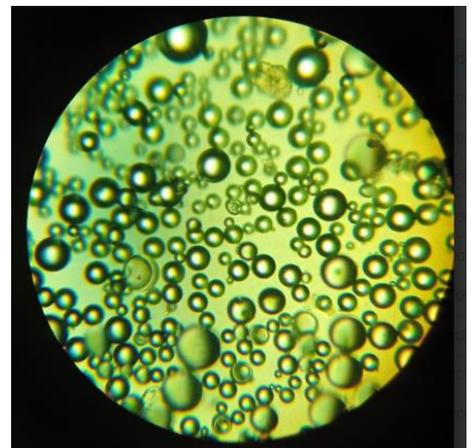


Figure 22 : Billes de verre sphériques vues au microscope

Nous avons alors versé cette poudre dans un cristalliseur contenant à peine 1 mm d'eau, mais il était impossible d'obtenir une stalagmite : les billes de verre s'étaient étalées sur toute la surface du cristalliseur. Par conséquent, nous avons refait un montage semblable au montage figure 7 (page 5), mais avec un diamètre du socle plus petit, à peine 7 mm, de façon à avoir une base adaptée à la taille des billes.

Voici alors ce que nous avons obtenu : Figure 24 – vidéo de l'expérience : <https://youtu.be/tah-QuTroFk>

L'expérience montre finalement qu'il est tout à fait possible d'obtenir des stalagmites avec des billes de verre sphériques. La surface anguleuse d'un grain de sable n'est donc pas indispensable à la formation de la stalagmite.

Ces stalagmites mettent plus de temps à croître, et se cassent généralement une fois que la stalagmite atteint 2 à 3 cm de hauteur.

Nous supposons que la différence de vitesse de croissance avec le sable provient du fait que l'eau ne peut pas monter aussi vite par capillarité dans cette poudre de verre que dans le sable.

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons mesuré la vitesse à laquelle monte l'eau dans une colonne de billes de verre, de la même manière que nous l'avons fait avec le sable.

Voici les résultats obtenus : Figure 24



Figure 23 : Réalisation d'une stalagmite de billes de verre sphériques

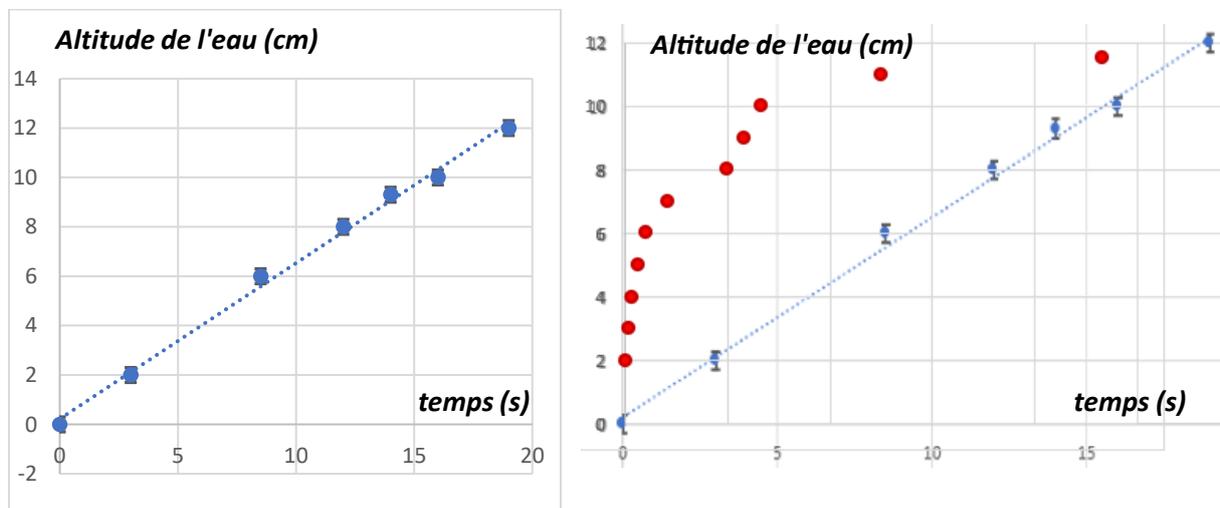


Figure 24 : A gauche : Evolution de la hauteur atteinte par l'eau dans une colonne de billes de verre en fonction du temps. A droite : comparaison avec l'évolution atteinte par l'eau dans la colonne de sable (en rouge)

Les résultats confirment bien notre hypothèse : en comparant l'évolution de la montée de l'eau dans le tube de sable et dans le tube de billes de verre, on voit bien que la progression est plus lente au départ dans la colonne de billes de verre que dans le sable. Par contre, on remarque aussi que l'eau atteindra la hauteur de 12 cm plus rapidement dans les billes de verre que dans le sable.

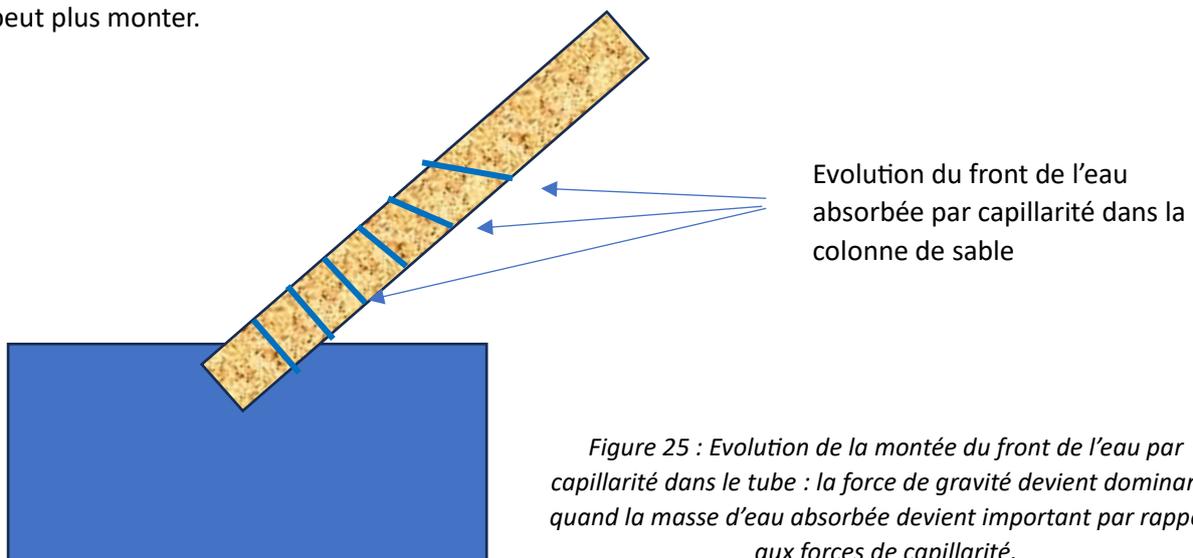
Ce résultat est particulièrement intéressant car il permet de discuter sur la compétition entre force de gravité et force de capillarité. Voyons cela :

Nous avons mesuré l'espace disponible entre les billes de verre, en versant le volume d'eau nécessaire dans un éprouvette contenant un volume connu de billes de verre, jusqu'à ce que l'eau versée surnage à peine au-dessus des billes. Nous avons alors mesuré que l'on peut ainsi verser 6,2 mL d'eau dans un volume de 20 mL de billes de verre, ce qui signifie que dans un tas de billes de verre, 31% du volume n'est occupé que par de l'air et est donc disponible. Nous avons fait de même avec le sable non trié, ainsi qu'avec le sable fin. Dans ces deux derniers cas, nous avons trouvé que 39% du volume est occupé par de l'air. Cela signifie que plus le sable est fin, plus les interstices entre les grains sont petits. En effet, même si on trouve 39% du volume disponible dans le cas du sable non trié et dans le cas du sable fin, comme le sable fin contient plus de grains, ce volume est davantage divisé en petites portions.

Le sable fin se comporte donc comme un ensemble de capillaires plus étroits. Or plus un capillaire est étroit, plus les forces de capillarité permettent de faire avancer l'eau. D'autre part, plus un capillaire est étroit, plus la masse d'eau à faire avancer est faible, donc moins la force de gravité est forte. C'est pour cela que dans le cas des billes de verre, l'eau peut monter plus haut que dans le sable de plage. Par contre, cette montée sera plus lente car les interstices étant plus étroits dans les billes de verre, les frottements y seront également plus importants.

Pour illustrer davantage cette compétition entre gravité et capillarité, nous avons eu l'idée de faire l'expérience démonstrative suivante : figure 25 – vidéo de l'expérience : https://youtu.be/jhF_aylXss

Nous avons rempli un tube de sable, fermé avec de la gaze à son extrémité inférieure, et nous l'avons rempli de sable. Nous avons alors mis l'extrémité inférieure dans un récipient d'eau colorée, en penchant le tube (vidéo). On peut voir alors sur la vidéo qu'au début, l'eau avance dans le tube et le front d'eau est perpendiculaire à l'axe du tube. Puis au bout d'environ 6 cm, ce front se modifie et tend à devenir horizontal. Cela illustre bien la compétition entre gravité et capillarité car lorsque la masse d'eau absorbée par le sable augmente, cela augmente la force de gravité sur l'eau. Cette force commence alors à être du même ordre de grandeur que la force de capillarité. C'est le moment où le niveau de l'eau commence à devenir horizontal. Puis la force de gravité devient plus grande. Au bout d'un moment, la force de capillarité devient négligeable par rapport à la force de pesanteur et l'eau ne peut plus monter.



2) Sable tamisé pour disposer de trois types de taille de grain de sable

Voyons maintenant les stalagmites que l'on peut obtenir avec des grains de sable que nous avons triés selon leur taille. Nous disposons pour cela de tamis de tailles de maille variables : un tamis de maille 0,5 mm, et un tamis de taille 0,25 mm. Nous avons pris une masse $m = 370$ g de sable que nous avons

fait passer dans le tamis de maille 0,25 mm. Nous avons ensuite fait passer le sable restant dans le tamis de 0,5 mm. Nous en avons profité pour connaître la proportion massique de l'ensemble des grains dans le sable de plage :

	Petits grains	Grains moyens	Gros grains
masse (kg)	0,16	0,193	0,017
proportion massique	43,24%	52,16%	4,59%

Nous avons alors réalisé des stalagmites avec ces trois ensembles de sable pour savoir si des différences notables existaient, et nous en avons trouvé !

Tout d'abord, nous n'avons obtenu aucune stalagmite avec les gros grains (de dimension comprise entre 0,5 mm et 1 mm).

En revanche, nous avons obtenu des stalagmites avec les petits et moyens grains, dont le hauteurs moyennes étaient :

- Petits grains : $(1,8 \pm 0,4)cm$
- Moyens grains : $(2,8 \pm 0,6)cm$

Il est donc plus simple de faire des stalagmites avec des grains de tailles moyennes que des grains de petites tailles. Cela dit, nous venons de penser à quelque chose tout en écrivant cette dernière phrase : les stalagmites avec les petits grains sont certes en moyenne plus petites, mais si on rapporte la taille de la stalagmite à la taille du grain, il serait intéressant de savoir laquelle les stalagmite compte le plus de grains selon la hauteur.

Nous avons donc fait le quotient de la hauteur moyenne avec la taille des grains (figure 26).

Types de grains	Petits grains	Grains moyens
Hauteur moyenne des stalagmites (cm)	1,875	2,75
Taille moyenne des grains	0,0125	0,0375
Rapport Taille de la stalagmite / taille d'un grain	200	120

Figure 26 : Tableau présentant le rapport entre la taille des grains et la hauteur moyenne des stalagmites.

On constate donc que le rapport stalagmite/grain est beaucoup plus élevé pour les petits grains que pour les moyens. Si on modélise une stalagmite par un ensemble de couches de grains qui se mettent les unes sur les autres, on peut dire que les stalagmites réalisées avec les petits grains contiennent presque 2 fois plus de couches de grains que celles réalisées avec les grains de tailles moyennes. Cela dit, on ne pourra pas réaliser une grande stalagmite avec de petits grains car la masse volumique d'une stalagmite étant plus importante avec des petits grains qu'avec des gros grains, la force de pesanteur exercée sur l'ensemble de la stalagmite rendra fragile la base de celle-ci.

Finalement, même si le fait d'avoir réalisé des stalagmites avec d'autres formes ou d'autres tailles de grains nous a permis d'avancer sur la compréhension de la formation de la stalagmite, le fait de travailler avec du sable de plage résultant d'un mélange de différentes tailles de grains semble être un très bon compromis pour réaliser de grandes stalagmites.

Conclusion :

L'étude que nous avons menée nous a permis non seulement d'avoir une idée de la façon de réaliser une grande stalagmite, mais aussi nous a permis de mieux comprendre la façon dont se forme la stalagmite.

Pour réaliser une grande stalagmite, il convient donc de gérer le débit du sable en adéquation avec le taux d'humidité qui permet d'avoir une cohésion maximale entre les grains de sable.

Cela nécessite de connaître la vitesse maximale à laquelle l'eau peut monter dans le sable, tout en sachant que cette vitesse dépendra de la taille moyenne des grains de sable.

Ainsi, c'est l'ensemble de nos expériences qui nous ont permis de noter et comprendre les conditions nécessaires à la réalisation d'une stalagmite.

Voici alors la méthode que nous pouvons préconiser : Quand la stalagmite se casse, elle se casse au niveau de la base. Or c'est justement à cet endroit que l'humidité est la plus grande et nous avons vu qu'une grande humidité n'est pas favorable à une grande cohésion des grains de sable. L'humidité optimale serait de l'ordre de 10%. Il faudrait donc verser du sable, puis couper l'arrivée d'eau à la base de la stalagmite, verser à nouveau du sable de façon à ce que l'eau déjà absorbée par le début de stalagmite formée soit attirée vers le haut par capillarité, ce qui diminuera le taux d'humidité de la base. Une fois que le sable versé ne s'accroche plus, on place l'entonnoir à une hauteur permettant à l'eau d'alimenter à nouveau la stalagmite, pendant 5 secondes environ (car on a vu que la montée par capillarité est très rapide lorsque le sable n'est pas saturé en eau), puis on coupe à nouveau l'arrivée d'eau, et ainsi de suite.

Pour réaliser cela, il faudrait que nous ayons un cylindre transparent pour mieux gérer les niveaux d'eau avec lesquels nous travaillons. Nous venons de réaliser cela et il nous reste maintenant à appliquer notre recette pour participer au concours de la plus belle stalagmite.

Pour finir, nous comptons exploiter davantage nos mesures pour tenter de donner un ordre de grandeur des forces mises en jeu au sein des différentes tranches de stalagmite.

Nous remercions Florian Moreau, maître de conférence à l'Université de Poitiers, institut Pprime ISAE ENSMA, avec qui nous avons pu échanger sur le sujet.

Annexes :

Annexe 1 : Dimension moyenne d'un grain de sable de plage :

Pour simplifier la situation, commençons par modéliser le grain de sable par une sphère. L'observation des grains au microscope montre que la dimension moyenne d'un grain est de l'ordre de 0,4mm.

Pour obtenir cette valeur, nous avons observé le sable au microscope et l'avons classé parmi 3 groupes en fonction de leur diamètre. Nous avons alors compté, sur une image, le nombre de grains dans chaque catégorie, puis nous avons fait une moyenne avec les trois dimensions caractéristiques des différentes catégories, pondérée du pourcentage avec lequel on trouve ces grains en moyenne dans le sable.

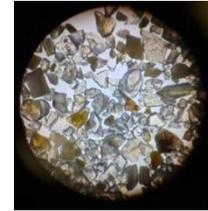


Figure 8 : sable de plage visualisé au microscope

	Gros grains	Moyens grains	Petits grains
Dimension la plus grande	Entre 0,9 et 0,6 mm	Entre 0,6 et 0,3 mm	Entre 0,3 et 0 mm
Nombre de grains	18	22	34
%	24	30	46

Annexe 2 : Chute d'un grain de sable en absence de frottement

En appliquant la deuxième loi de Newton au grain, on en déduit alors que

$$\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a}$$

Nous avons cherché la masse volumique de la silice : $2,56 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.

On peut dire que la poussée d'Archimède est négligeable devant la force de pesanteur car la masse volumique de la silice est bien plus élevée que la masse volumique de l'air. Donc

$$\vec{P} = m\vec{a}$$

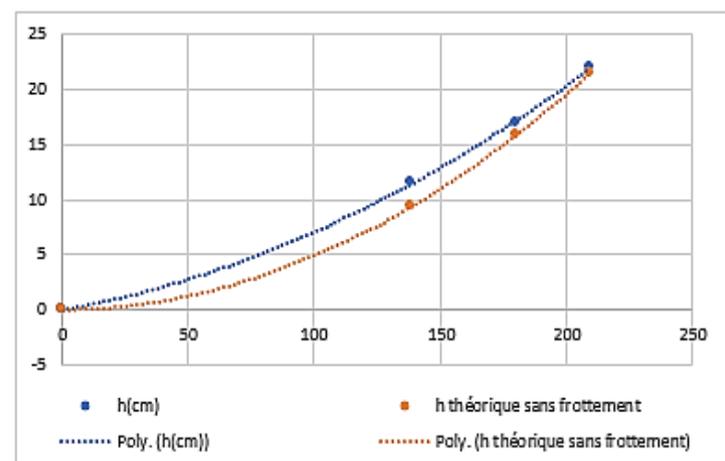
$$g = a_z$$

en intégrant une première fois par rapport au temps :

$$v_z(t) = gt$$

en intégrant une deuxième fois par rapport au temps :

$$z(t) = \frac{1}{2}gt^2$$



Nous pouvons alors comparer l'évolution de la distance réelle parcourue par les grains à celle qu'ils sont censés parcourir en l'absence de frottement.

Précisons tout de même que nous avons appliqué la deuxième loi de Newton à un grain, alors qu'ici, il y a sans doute des phénomènes à prendre en compte dû au fait qu'il s'agit d'un écoulement constant de grains. D'autre part, nous avons pris une vitesse initiale de chute égale à 0 alors que ce n'est pas exactement le cas.