Sel de la science

LP2I
Lycée Pilote
Innovant International

Projet présenté par :

Florent DOYELLE
Gabriel SOLEIL
Augustin CHAMBON

Sel de la science

Résumé

Lorsque l'on met des grains de sel dans une casserole et qu'on les fait chauffer à de fortes températures, ceux-ci se mettent à sauter. Nous avons voulu comprendre exactement ce qui pouvait être responsable d'un tel phénomène. S'agit-il d'eau présente dans le sel ? D'autres impuretés ?
Il nous a fallu mener une démarche d'investigation au cours de laquelle nous devions faire de notre mieux pour gérer les différents paramètres qui pouvaient entrer en compte dans le phénomène. Par exemple, les grains de sel pouvant être très différents les uns des autres, nous avons dû en faire nous-même. Au final, nous avons essayé de récolter le plus d'indices possibles, et de les faire évoluer, de façon à faire évoluer notre réflexion autour de ce phénomène. C'est ce que nous exposons ici.

Sommaire :

Introduction

I – Est-ce que quelque chose s'échappe du sel lorsqu'on le chauffe ?
II – La variation de la température provoque-t-elle une variation de la structure du grain de sel ?
III – Une approche énergétique du phénomène
IV – De nouveaux éléments, parfois étranges

Conclusion

Introduction

Nous nous sommes intéressés à un phénomène particulier que l'on peut observer chez soi tous les jours : lorsque l'on verse du sel dans une poêle chaude, certains grains peuvent s'agiter, voire même sauter. C'est en tous cas une observation qu'a faite l'un d'entre nous, et la question nous a intrigué au point où nous avons voulu en faire un projet pour essayer d'en comprendre la raison et de mettre notre grain de sel pour percer le mystère caché derrière ce phénomène.

Nous avons alors commencé par partager cette observation, en reproduisant l'expérience au lycée afin que tous puissent constater le phénomène. Et suite à cela, nous avons commencé notre investigation, que nous vous présentons ici de façon chronologique afin que vous puissiez suivre l'enquête que nous avons menée.

Lien ver la vidéo de 5 minutes : https://www.dailymotion.com/video/x7zr596

I – Est-ce que quelque chose s'échappe du sel lorsqu'on le chauffe ?

1) Une vie de sel soumis aux fortes températures

Et ce fut là en réalité notre première petite difficulté. : les conditions étaient différentes de celles dans lesquelles on se plaçait chez nous : au lycée, nous ne disposons que de plaques chauffantes, alors que la source de chaleur utilisée à la maison était du gaz. Et finalement, avec la plaque chauffante, nous n'avons rien observé du tout.
Que ce soit avec du gros sel, ou du sel de table, rien n'y a fait, nous n'avons même pas pu constater un frémissement des grains de sel.

Pour expliquer cette différence de comportement, nous avons alors naturellement pensé à trois hypothèses :

- soit le sel utilisé à la maison était un sel particulier,
- soit que le revêtement de la poêle utilisée au lycée est différent de celui de la poêle utilisée à la maison
- soit la source thermique utilisée pour chauffée le sel a son importance.

Pour savoir laquelle de ces hypothèses s'avère vraie, nous avons commencé par ce qui était le plus simple à faire : nous avons changé de récipient. Au lieu d'une poêle recouverte d'un traitement anti adhésif, nous avons utilisé une casserole en inox.
Mais le constat a été le même : pas de frémissement du sel
Nous avons alors poursuivi en utilisant différents types de sel : du petit sel, du gros sel, du sel régénérant pour lave-vaisselle… bref, ce qui était disponible au lycée. Mais là encore, impossible de voir quoi que ce soit de particulier.
Il restait alors à changer la plaque chauffante. La source de chaleur utilisée ne produisait en effet peut-être pas la même température…
Et en effet, nous avons mesuré la température de la plaque chauffante utilisée lors de nos expériences : 245°C. C'est très faible comparé à la température que peut atteindre la flamme issue de la combustion du gaz de ville : 900°C. Or, nous ne disposons pas de flamme au lycée, l'agent technique du laboratoire nous ayant dit que les flammes avaient été interdites depuis quelques années. Mais pour remplacer cela, le laboratoire utilise un outil électrique pour chauffer, capable d'atteindre une température de 500°C. Et ce fut suffisant ! en disposant n'importe lesquels des sels cités précédemment, nous avons pu observer la danse du sel. Une danse qui parfois amène même le sel à sauter.

Figure 1 : chauffage règlementaire au lycée

En cherchant ainsi à partager entre nous le phénomène, nous avons pu nous rendre compte d'une première chose : il y a une température limite en dessous de laquelle le phénomène ne semble pas se produire.

Intéressons-nous alors de plus près à la température. Quelle valeur doit-elle atteindre pour pouvoir observer le phénomène ?

Et bien ce n'est pas si simple que cela… nous avons disposé des grains de sel sur la plaque froide dans le but de déterminer la température à partir de laquelle le sel saute. Et là, nouvelle désillusion : le sel ne saute plus. Nous avons refait l'expérience qui confirme que la température de la plaque ne suffit pas à l'observation du phénomène. Alors qu'avons-nous fait de particulier la première fois que nous avons vu le sel sauter ?

Nous cherchions la température atteinte par la plaque, puis nous avons mis le sel sur la paque chaude.
Alors nous avons procéder à nouveau de cette façon-là, et effectivement, en faisant les choses dans cet ordre-là, on observe bien le phénomène ! Du coup, à partir de ce moment, nous avons tout d'abord fait chauffer la plaque, et une fois atteinte une certaine température, nous avons déposé le sel. L'expérience montre alors que le sel ne saute que si la plaque est préalablement chauffée avec une température minimale. Alors nous avons recherché cette température en chauffant la plaque, puis en mettant du sel une fois une température donnée atteinte. Bien entendu, nous avons reproduit l'expérience un grand nombre de fois, pour voir si nous trouvions la même température nécessaire pour faire sauter le sel. Cela a pris naturellement beaucoup de temps.

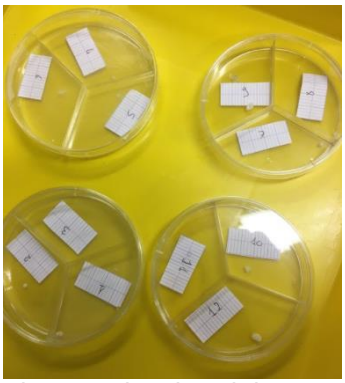


Figure 2 : étude de 12 grains de sel de masses différentes

Il y avait d'autre part quelque chose d'autre que nous avons pris en compte pour réaliser ces expériences : il s'agit de la masse des grains de sel. Celles-ci étant toutes différentes, nous voulions voir s'il y avait un rapport entre la masse du grain de sel et la température à atteindre pour le voir sauter.

Les masses ont été mesurées avec une balance précise au di millième de gramme près.

Voici alors les résultats obtenus :

	Masse de départ en g	Température en °C (ou il y a un changement)	Masse après chauffage en g
Grain 3	0,0035	-	-
Grain 5	0,0055	380	0,0054
Grain 4	0,0065	-	0,0062
Grain 2	0,0076	320	0,0064
Grain 8	0,0101	509	0,0100
Grain 11	0,0109	512 (fissuré en deux)	0,0085
Grain 7	0,0166	470	0,0158
Grain 6	0,0192	312	-
Grain 10	0,0246	-	0,0249
Grain 1	0,0273	-	0,0265
Grain 12	0,0518	-	0,0519
Grain 9	0,0521	490	0,0523

Les cases comportant des traits concernent les cristaux de sel avec lesquels on n'a pas obtenu le phénomène étudié.
On s'aperçoit, en regardant la deuxième colonne et la troisième colonne, qu'il ne semble pas avoir de lien précis entre la masse du grain de sel, et la température minimale que doit avoir la plaque pour voir le grain sauter ou ne serait-ce que bouger.
L'expérience montre par ailleurs que la température minimale que doit avoir la plaque est de l'ordre de 300°C.

A ce stade de notre étude, peut-on envisager une explication au phénomène observé ?

On peut déjà formuler des hypothèses :

Est-ce possible que de l'eau soit emprisonnée dans les grains de sel, et que cette eau soit responsable du phénomène observé ?
En fait, comme nous avions déjà pensé à cette hypothèse, nous avions, lors des expériences précédentes, mesuré la masse des grains aussi bien avant de les chauffer qu'après qu'ils aient conduit au phénomène étudié. La dernière colonne du tableau précédent montre ainsi la masse du grain de sel récupéré après chauffage. L'idée est alors de savoir si de l'eau s'est évaporée lors du chauffage.

Les résultats tendent à montrer qu'il y a une différence dans le sens ou le grain de sel perdrait de la masse, mais celle-ci reste légère. Il y a même 3 grains qui semblent avoir gagner de la masse, ce qui paraît peu probable, et qui doit donc être dû à des incertitudes sur les mesures.

Il y a tout de même une tendance générale qui montre une diminution de la masse. Mais peut-on réellement attribuer cela à une perte d'eau éventuelle présente dans le sel initialement ? La question se pose étant donnés les faibles écarts d'une part, mais aussi du fait qu'en sautant, il est probable qu'une infime partie du grain de sel, non perceptible à l'œil nu, se soit détaché du grain et soit alors responsable de cette diminution de la masse mesurée. Par contre une chose est certaine, cela ne résulte pas d'une perte de masse due à la fusion du sel, car nous avons pu lire que celle-ci à une valeur de 801°C, soit une température bien supérieure aux températures avec lesquelles nous travaillons.

Ne voulant pas rester dans le doute, nous avons décidé de tester la présence d'eau dans le sel en mélangeant du sel avec du sulfate de cuivre anhydre. En présence d'eau, nous savons en effet que le sulfate de cuivre prend une coloration bleue.
Et voilà ci-dessous le résultat de nos expériences :
A gauche, le récipient de sulfate de cuivre et le sachet de gros sel testé.
Au milieu, le résultat issu du mélange entre le gros sel et le sulfate de cuivre.
A droite, la comparaison entre le récipient de sulfate de cuivre anhydre et le mélange de sel et de sulfate de cuivre anhydre.

Figure 3 : au milieu : mélange sel + sulfate de cuivre anhydre – A droite, comparaison des couleurs du mélange et du sulfate de cuivre anhydre.

Puisqu'on ne voit pas de coloration bleue particulière dans le bécher dans lequel on a fait le mélange, on en a conclu qu'il ne devait pas y avoir d'eau dans les cristaux de sel.
Il faut donc explorer une autre hypothèse…

Mais avant cela, nous avons cherché d'autres indices, d'autres pistes d'investigation. Par exemple, obtient-on un phénomène similaire avec d'autres cristaux ?

2) Les autres cristaux frémissent-ils lorsqu'on les chauffe ?

En fait, la question est intéressante pour deux raisons différentes. D'une part on peut étudier l'influence de la structure cristalline sur le phénomène observé. Et d'autre part, il a été évoqué par le jury, lors des qualifications, la question suivante : se pourrait-il que les ions sodium se transforment en sodium atomique, et qu'une éventuelle présence d'eau fasse une réaction avec le sodium atomique conduisant à un phénomène violent localement ? Voyons alors comment nous avons tenté de répondre aux 2 questions évoquées ici.
Comme le sel est un solide ionique, formé d'ions Na+ et d'ions Cl-, nous avons dans un premier temps étudié le comportement d'un autre sel ionique : un sel de chlorure de potassium KCl formé d'ions K+ et d'ions Cl-. De plus, comme le NaCl, le KCl cristallise sous forme de deux mailles cubiques centrées enchevêtrées l'une dans l'autre de sorte que les ions positifs occupent le centre des faces du cube.

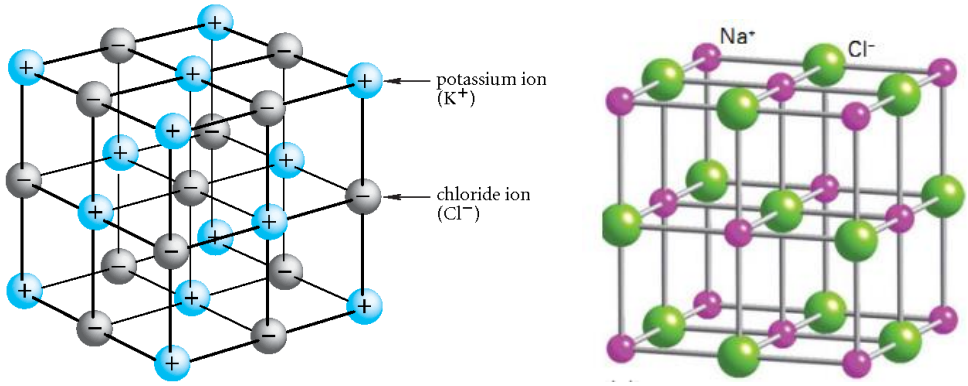


Figure 4 : Structure des cristaux NaCl ,et de KCl

Et bien en mettant des cristaux de KCl sur la plaque chaude, nous avons pu obtenir le même phénomène, à des températures équivalentes à ce qu'on avait avec le NaCl. Le phénomène serait alors dû à la structure cristalline ? Voyons cela…
Que se passe-t-il si on dispose un cristal doté d'une autre forme cristalline ? Nous avons trouvé au laboratoire des cristaux de chlorure de calcium $CaCl_2$. Or nous avons pu lire que le chlorure de calcium cristallise selon une maille identique similaire à celle de l'oxyde de titane TiO2, c'est-à-dire selon une maille orthorhombique : figure 5a.
Nous avons alors pu constater qu'en disposant ces cristaux sur la plaque chaude, le phénomène se produit à nouveau : les cristaux sautent.

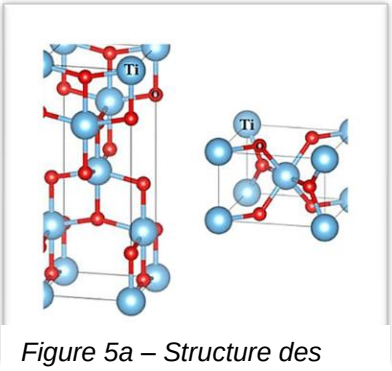


Figure 5a – Structure des cristaux de TiO_2.

La structure cristalline ne semble donc pas intervenir dans le phénomène étudié. Mais il est aussi possible que les différents cristaux étudiés sautent pour des raisons différentes. Par exemple, nous avons pu lire que les cristaux de $CaCl_2$ sont particulièrement hygroscopiques. Il est alors possible que les cristaux de $CaCl_2$ que nous avons fait sauter possédaient de l'eau que cette eau soit responsable du phénomène. Une

autre remarque : les cristaux de KCl possèdent des ions potassium. Or le potassium, comme le sodium, est un alcalin qui à l'état atomique, peut réagir violemment avec l'eau. Donc NaCl et KCl pourraient quant à eux sauter du fait de la présence de ces alcalins.

Et par ailleurs, sans le vouloir, nous avons toujours fait sauter des cristaux contenant des ions Cl^-.

Nous avons alors cherché d'autres cristaux, et nous avons trouvé du fluorure de calcium CaF_2. Nous avons pu lire que ces cristaux ne sont pas du tout hygroscopiques. Et contrairement aux autres cristaux étudiés, il ne contient ni ions Cl-, ni ion alcalin qui pourrait se transformer en atome pouvant réagir de façon violente avec l'eau. Par ailleurs, le fluorure de calcium cristallise selon une maille encore différente des précédentes. Et pourtant…. Il saute aussi.

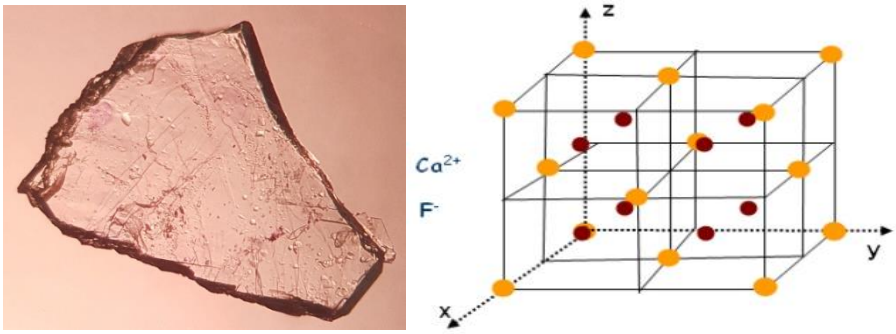


Figure 5b : cristal de CaF_2, et structure du CaF_2

Ce résultat nous pousse donc à penser que peu importe les ions composant le cristal, et peu importe la structure cristalline, le phénomène se produit toujours. Et il ne semble pas non plus que le phénomène soit dû à la présence d'élément alcalin dans le cristal. Pour tenter de confirmer ce dernier point, nous avons d'ailleurs réalisé à nouveau l'expérience avec du NaCl, après l'avoir mis dans une cloche à vide (figure 6) pour éventuellement faire évaporer l'eau présente, puis dans un environnement où était disposé un déshumidificateur d'air. Et nous avons pu constater que les cristaux sautaient toujours avec la même facilité.

Figure 6 : grain de sel dans une cloche à vide

Pour finir avec l'influence de la nature du cristal sur le phénomène étudié, il peut aussi être intéressant de voir si le phénomène se produit avec des cristaux covalents, tels que ceux de saccharose.

Nous avons donc déposé des cristaux de saccharose (figure 7) sur la plaque chauffante, et nous avons obtenu un très joli caramel dans un premier temps. Du coup, nous avons vérifié quelle est la température de fusion du saccharose : 186°C. Après avoir fait attention à ne pas dépasser cette température, nous avons recommencé l'expérience, et nous avons constaté que les cristaux de saccharose ne subissent pas le même phénomène. Cela dit, le fait de travailler avec des températures plus faibles ne permet peut-être pas de déclencher le phénomène.
Il faudrait donc trouver des cristaux moléculaires avec des températures de fusion supérieures à environ 400°C, ce que nous n'avons pas encore trouvé.

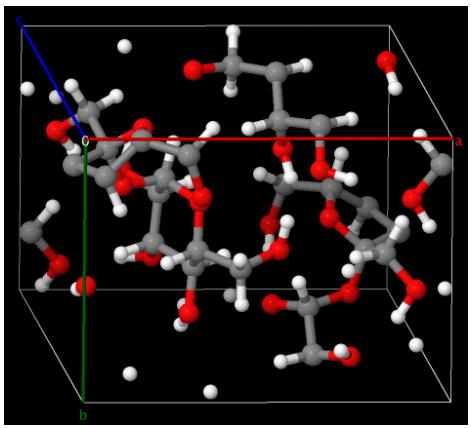


Figure 7 : Structure du saccharose

II – La variation de température provoque-t-elle une modification de la structure du grain de sel ?

1) S'agit-il d'une modification de la forme cristalline ?

Nous avons décidé d'observer les cristaux de sel au microscope avant et après le phénomène observé.

En fait, une autre des hypothèses que l'on avait au départ portait sur la forme cristalline du sel en fonction de la température. En quelque sorte, est ce que la structure du NaCl reste toujours la même en fonction de la température, ou alors le sel est-il capable de changer de forme cristalline ? Nous pensions à cela car comme un changement d'état peut-être assez brutal, cela pourrait expliquer le mouvement brutal du sel.
Mais en nous plongeant sur ce sujet, trop d'indices ont tendance à nous faire douter de cette hypothèse. Par exemple, s'il y a un changement d'état, il doit se faire à une température précise, ce qui n'est pas du tout le cas d'après les résultats que nous avons obtenus. On peut toutefois avoir des phénomènes de retard au changement d'état, mais est-ce que c'est le cas ici ? Un élément parle en faveur de cette hypothèse : on a vu que si on dépose le cristal sur la plaque froide et qu'on chauffe ensuite la plaque, le phénomène ne se produit pas. Comme si une élévation progressive de la température permettait au cristal de se modifier à une température donnée qui correspondrait à sa véritable température de changement d'état.
Cela dit, on a des doutes vu les écarts de températures observés auxquelles se déroule le phénomène. Même dans l'hypothèse qu'il y ait un retard au changement d'état, il est peu probable qu'il conduise à des différences de température de quasiment 60% de la valeur maximale de la température mesurée pour obtenir le phénomène.

Par ailleurs, nous nous sommes aperçus que les cristaux de sel ne sautaient qu'une seule fois. Si on laisse le sel sur la plaque chaude, il n'y a pas d'autre saut. Si après avoir sauté, on enlève le cristal de sel, on le laisse refroidir, et on le remet à nouveau sur la plaque chaude, alors il ne saute plus.
Or là encore on peut penser que si le cristal change de forme cristalline en chauffant, il doit à nouveau changer de forme en refroidissant, et on devrait alors pouvoir de nouveau le faire sauter en le chauffant une nouvelle fois. Ce n'est pas le cas.
Et si un cristal de sel n'a pas sauté la première fois qu'on l'a déposé sur la plaque, il ne sautera pas les autres fois qu'on l'y déposera. Pourquoi un cristal changerait de variété cristalline et pas un autre ?

Voilà donc autant d'éléments qui nous portent à croire qu'il ne s'agit pas là d'un changement de forme cristalline.

Et pourtant, il se passe bien quelque chose…

2) Que peut-on observer au microscope ?

En fait, comme nous voulions faire des observations précises, nous avons réalisé nous-même nos cristaux. Il y a plusieurs avantages à faire cela. Tout d'abord, on sait ce qu'ils contiennent. Ensuite, on peut les faire de différentes manières, lentement, ou plus rapidement en laissant l'eau s'évaporer lentement.

Nous avons ainsi réalisé des cristaux de NaCl très réguliers, bien organisés, d'autres beaucoup moins réguliers, ainsi que des cristaux de KCl.

Voyons alors ce que donne l'observation des cristaux au microscope :

Commençons par les cristaux de NaCl bien organisés

a – Observation des cristaux de NaCl bien organisés.

Figure 8 : à gauche : Cristallisation lente de NaCl – à droite, vue au microscope du cristal obtenu

On peut voir à gauche plusieurs cristaux. L'image du milieu montre le cristal de NaCl disposé au centre du fond du bécher. L'image de droite est l'observation du cristal par le dessus, au microscope.

On peut voir de façon générale que la partie centrale des cristaux obtenus est opaque, contrairement au reste du cristal qui lui est bien transparent. Cette zone opaque paraît blanchâtre à l'œil nu dans l'image du milieu. Nous pensons que cela vient du fait que les ions Cl- et Na+ sont particulièrement bien organisés dans tout le cristal, sauf dans une zone opaque. On peut affirmer cela car au niveau de toutes les parties en périphéries, les lignes du cristal sont parfaitement régulières (on voit bien une forme cubique extrêmement bien dessinée)

- Cristaux déposés sur plaque froide :

Nous avons commencé par chauffer les cristaux lentement, en les déposant sur la plaque froide, et en augmentant la température petit à petit jusqu'aux températures habituelles pour lesquelles on observe le phénomène. Conformément à ce qu'on avait obtenu lors de nos premières expériences, le phénomène ne s'est pas produit. Pour autant il ne s'est pas rien passé. En effet, nous avons observé le cristal après l'avoir fait chauffer, et nous obtenons ceci :

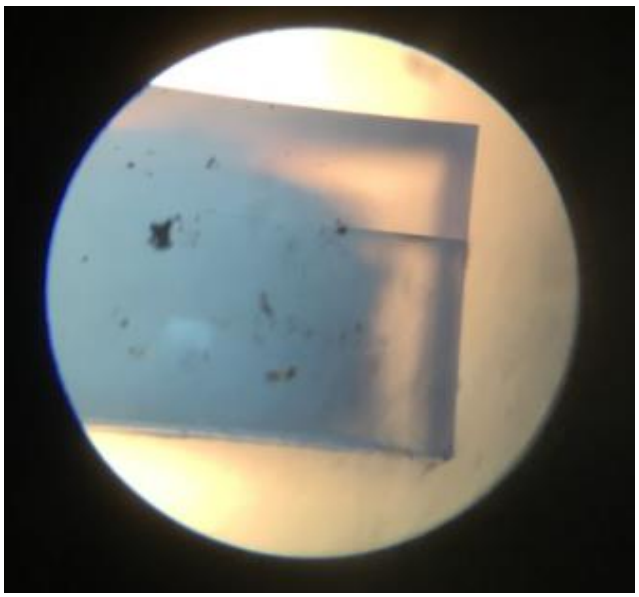


Figure 9 : Cristal de NaCl apprès chauffage progressif

On y voit donc plusieurs choses particulièrement intéressantes :

Seule les zones en bordure du cristal sont restées transparentes. Tout le reste est devenu opaque.
D'autre part, on observe un trait bien net qui n'était pas présent initialement.

- Cristaux déposés sur plaque chaude :

Voyons maintenant ce que donne un cristal de sel obtenu également lentement et donc bien organisé, déposé cette fois-ci sur la plaque déjà chaude : Le phénomène s'est bien produit et nous avons pu observer le cristal sauter.

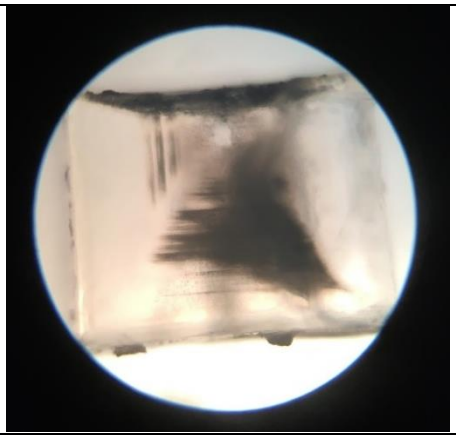
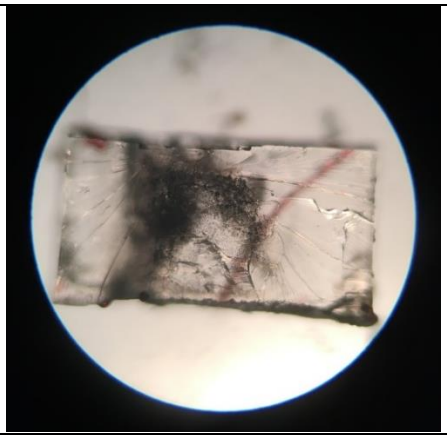
Avant	Après
	

Figure 10 : Un autre cristal de NaCl avant et après chauffage très rapide

On retrouve avant le saut une organisation similaire à celle présentée avec le précédent cristal. Par contre, on voit dans le cristal obtenu après le saut un ensemble de microfissures qui semblent converger vers une zone assez bien localisée dans le cristal.

b – Observation des cristaux de NaCl mal organisés.

Et bien lorsque les cristaux sont mal organisés, ils sont opaques, et on ne peut alors pas les observer par transparence avec le microscope précédent, mais on a pu les observer en surface (figure 11). On s'est aperçu alors que la forme du cristal après le saut restait assez proche de la forme initiale. Il était difficile de voir une différence, sauf bien entendu lorsque le grain cassait.

Figure 11 : Cristal de sel mal organisé

c – Cristaux de KCl

Nous n'avons pas réussi à faire des cristaux de KCl bien organisés, mais uniquement des cristaux de formes assez désordonnées. Les observations faites alors avec ces cristaux de KCl avant et après le saut du cristal étaient identiques à ce que l'on pouvait observer pour les cristaux de NaCl.

3 – Conclusion sur cette partie

Il y a quelque chose qui provoque les microfissures. Ce n'est pas une simple dilatation du cristal qui en est la cause, car une dilatation excessive doit simplement briser les liaisons ioniques et conduire à l'écroulement et donc la fonte du cristal.

Nous pensons donc que quelque chose se passe au niveau des défauts du cristal. D'ailleurs, on a bien vu sur les photos que la zone opaque du cristal, que l'on attribue à une zone plutôt désorganisée, grandie lorsqu'on chauffe le cristal.

Il faut donc que nous étudions de plus près ces zones moins bien organisées.

On peut légitimement penser que si un cristal comporte des défauts, les zones du cristal séparées par ces défauts peuvent être amenées à vibrer différemment. Et on peut alors imaginer qu'au niveau des défauts il y ait donc des contraintes capables de provoquer le phénomène observé.
Peut-être que lorsque l'on chauffe lentement le cristal, ceci ne se passe pas parce que le cristal à le temps de s'adapter par rapport à ces contraintes.

Mais peut-être que l'explication est ailleurs :

Peut-être que finalement, contrairement à ce que l'on pensait à l'issue de nos premières expériences, il y a de l'eau qui s'est glissée au niveau d'imperfection du cristal, et que le fait de faire chauffer le cristal, l'eau se vaporise, créant une contrainte qui provoque le phénomène observé. Mais si le phénomène ne se produit qu'une seule fois, cela veut dire que toute l'eau serait sortie d'un seul coup du cristal. Difficile de l'affirmer… Il est vrai que normalement, on devrait dire qu'il n'y a pas d'eau dans le cristal compte tenu du test au sulfate de cuivre anhydre, mais finalement, nous avons appris que le sulfate de cuivre anhydre devenait bleu lorsque l'ion cuivre s'entoure de 5 molécules d'eau. S'il y a de l'eau dans les cristaux de sel,

ce n'est peut-être pas en assez grande quantité pour que le sulfate de cuivre anhydre devienne penta hydraté.

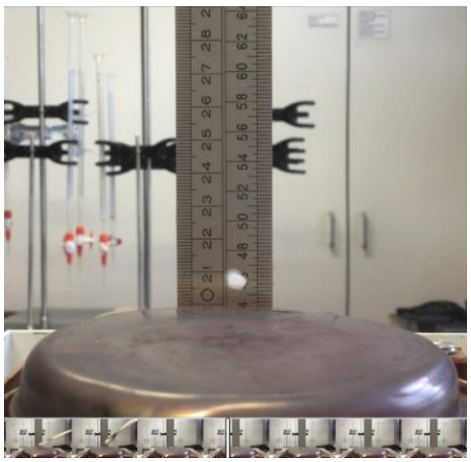
Nous poursuivons nos investigations pour tenter de trouver la solution à notre problématique.

Parallèlement à toutes ces recherches que nous avons déjà présentées, nous avons voulu mener une approche énergétique du phénomène. C'est ce que nous présentons dans cette troisième partie :

III – Une approche énergétique du phénomène :

1) Quelle est l'ordre de grandeur de l'énergie qui permet le saut du grain de sel ?

Face aux nombreuses questions que nous nous posons pour comprendre l'origine du phénomène étudié, nous essayons d'aborder nos recherches sous différents angles. Une étude énergétique nous a alors parue intéressante à mener



Nous avons filmé les grains de sel sauter de sorte de pouvoir estimer l'énergie qui provoque le saut du sel. Pour cela, il a fallu s'armer de patience : il nous fallait en effet un grain de sel qui saute selon un mouvement uniquement vertical, afin que de pouvoir analyser et exploiter beaucoup plus facilement sa trajectoire.
Vidéo du saut : https://youtu.be/ptsG28pwQSI

Figure 10 : saut d'un grain de sel

Connaissant alors la distance entre la position du grain de sel, de la règle et du téléphone, il a été possible de calculer la hauteur maximale atteinte par les grains de sel. Connaissant par ailleurs la masse des grains, il a alors été possible de calculer une énergie.

Voyons cela de plus près :

Avant que le sel ne saute, on peut dire que son énergie mécanique est nulle si on prend la référence de l'énergie potentielle nulle au niveau de la plaque chauffante.
Au moment du saut, le grain de sel acquière une énergie mécanique Em. On peut l'évaluer car lorsque le grain atteint le sommet de sa trajectoire verticale, son énergie cinétique est nulle et toute son énergie est sous forme d'énergie potentielle. Ainsi, si on ne tient pas compte des forces de frottement du grain avec l'air ambiant, pour avoir au moins un ordre de grandeur, on obtient

$$E_m = mgh$$

Voici alors un résultat obtenu pour un grain de masse 0,03 g

Grâce au théorème de Thales, nous avons pu déterminer la hauteur h du saut : 3 cm.

L'énergie mécanique est donc égale à :

$$E_m = mgh = 0{,}01\,J$$

Il y a donc un phénomène qui s'est produit, et qui a transformé une énergie en une énergie mécanique qui a un ordre de grandeur du centième de Joule. Nous pouvons essayer de comparer cette valeur à d'autres énergies susceptibles d'intervenir dans notre problématique. Par exemple, si finalement de l'eau est responsable du phénomène, est ce qu'une vaporisation des molécules d'eau pourrait générer une telle énergie ?

Et bien nous avons vu précédemment, en mesurant les masses initiales et finales des grains de sels, que les grains pouvaient perdre jusqu'à une masse $m = 1\,mg$. Si ces 1 mg sont 1 mg d'eau, sachant que l'énergie de vaporisation de l'eau vaut $L_v = 2{,}257.10^6 J/kg$, l'énergie libérée par la vaporisation de 1mg d'eau est égale à :

$$E = m \times L_v = 0{,}001 \times 2{,}257.10^3 = 2{,}3J$$

Cette approche énergétique permet donc de dire que l'eau reste une explication possible au phénomène observé. Mais ce n'est qu'une éventualité possible et non une preuve que de l'eau est responsable de quoi que ce soit.

Nous avons également voulu aborder l'aspect énergétique du phénomène en partant de l'énergie thermique.

2) Quelles informations peut-on déduire d'une étude thermique du phénomène ?

Nous savons que lorsque le grain est posé sur la plaque chauffante, il reçoit de celle-ci une énergie thermique Q.
Or

$$Q = mC\Delta T$$

où C = 920 J/(kg.K) est la chaleur massique du sel.

Vu la taille du grain de sel, et la durée qu'il reste sur la plaque chauffante, de l'ordre de quelques secondes au moins, on peut légitimement penser que sa température va vite être égale à la température de la plaque, soit environ 500°C.

Un grain de sel moyen, de masse 0,03g, va donc recevoir de la part de la plaque une énergie égale à, en prenant la température initiale du grain de sel aux alentours de 20°C,

$$Q = 0{,}03.10^{-3} \times 920 \times (500 - 20) = 13\,J$$

Il peut être intéressant de comparer cette énergie à l'énergie mécanique du grain lors du saut, qui est environ 1300 fois plus faible que cette énergie thermique.

Face à ces considérations énergétiques, nous revenons vers un scénario que nous avions émis dans la première partie pour expliquer le saut du sel. En effet, cet apport d'énergie thermique au grain de sel se traduit par une augmentation de son énergie interne, donc par une vibration de ses composants microscopiques. Cette vibration mécanique pourrait alors pourquoi pas engendrer parfois un mouvement de l'ensemble du grain, ou bien des vibrations différentes en différents endroits du grain si celui-ci n'a pas cristallisé en respectant la même organisation dans tout son volume.

Ce scénario nous semble plus crédible, d'autant plus que de nouveaux éléments sont venus se rajouter à nos observations… Nous allons les aborder dans la partie IV de ce mémoire

IV – De nouveaux éléments, parfois encourageants, et parfois étranges.

1) Une observation qui clarifie la situation :

a - L'observation et des premières tentatives d'explication

Nous avons pu procéder à d'autres expériences, en utilisant du matériel différent. Comme le laboratoire devenait moins accessible du fait des conditions sanitaires, nous avons fait l'acquisition d'un mini microscope, bien plus performant que ce que nous le pensions, pour pouvoir réaliser les expériences chez nous. Par ailleurs, nous disposions de différents sels, dont un sel de Guérande (figure 11) qui, outre ses qualités gustatives, nous a procuré bien des surprises qui tendent à clarifier la compréhension du phénomène, du moins en partie.

Figure 11 : gros grain de sel de Guérande, très peu régulier, vu au microscope x50

On peut voir qu'il est particulièrement mal organisé, avec non pas des arrêtes linéaires, mais plutôt courbes. Certains, plus rares résultent de l'assemblages de petits blocs mieux structurés.
Par ailleurs on peut voir que le sel de Guérande dont nous disposons contient des impuretés.

Nous avons mis ce gros sel dans une casserole en inox, chauffé fort au gaz de ville. Au bout de quelques minutes de chauffage, c'est alors un véritable concert de sel que nous avons entendu. Vous pouvez vous en rendre compte en suivant le lien vers la vidéo que nous avons filmée : https://youtu.be/MzszUwf0Q2k

En laissant alors le sel continuer de sauter, on pouvait constater qu'il se brisait. Et contrairement aux expériences précédentes menées au lycée, nous avons pu voir un même grain se briser plusieurs fois pour finalement donner un ensemble de grains beaucoup plus petits, de la taille de sel fin de table, comme ceux-ci, visualisés avec un grossissement proche de x500.

Figure 12 : Mini cristaux de NaCl obtenus en chauffant à haute température le sel de Guérande

Nous avons alors observé ces petits grains obtenus après le chauffage.

Nous pouvons voir que les grains obtenus présentent des géométries beaucoup plus régulières que le grain dont ils sont issus. Deux interprétations nous viennent alors :
Nous pensons alors que les grains se cassent au niveau de l'interface entre deux zones qui auraient cristallisé selon des directions différentes.
Mais il semblerait aussi que dans les mini cristaux de forme régulière obtenus, il n'y ait pas les points noirs que l'on observait dans le gros grain. Cela pourrait signifier que le gros grain se casse au niveau des impuretés qu'il contient. Cela dit, cette hypothèse n'est pas incompatible avec la précédente : les impuretés peuvent davantage se trouver au niveau des frontières entre les mini blocs qui s'assemblent pour former le gros grain.

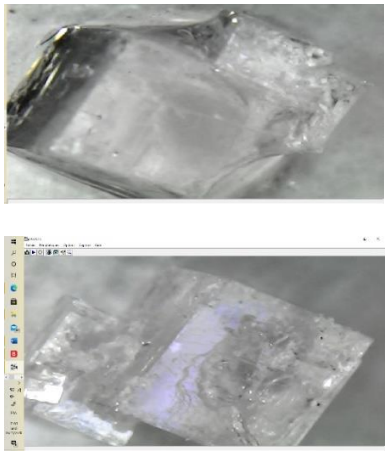
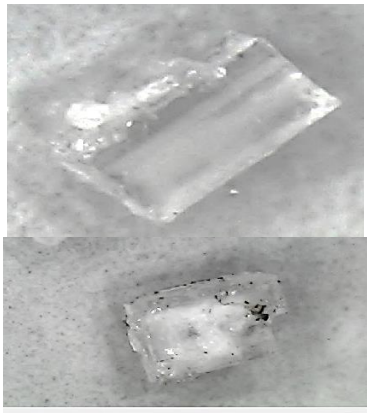
Les zones de frontières semblent donc représenter des zones où les contraintes sont fortes lorsqu'on chauffe le sel. Or, lorsqu'on chauffe le sel, on provoque forcément de l'agitation à l'échelle microscopique. Et il est alors probable que l'agitation soit ordonnée à l'échelle d'un petit bloc de cristal, mais pas sur l'ensemble du gros grain, du fait de l'assemblage aléatoire des petits blocs entre eux pour former le gros grain.
Quand la contrainte n'est plus supportable, le grain éclate. C'est donc comme si, d'un point de vue énergétique, le grain accumulait de l'énergie durant la phase de chauffage. Il y aurait donc une conversion d'énergie thermique en un autre type d'énergie. Et cette énergie serait alors libérée par à-coups lorsque la contrainte n'est plus supportable.
On pourrait peut-être comparer cela à une l'énergie libérée lors d'un tremblement de terre : les roches accumulent une énergie qu'elles libèrent lorsque les contraintes passent une valeur seuille.

Dans cette interprétation des choses, la molécule d'eau n'a pas une place particulièrement importante. Si elle intervient, ce serait au même titre qu'une autre impureté.

Ces dernières observations ayant été réalisées avec du sel de Guérande, nous avons voulu en faire d'autres avec su sel cristallisé par nos soins, donc de formes initiales beaucoup plus régulières :

Voici nos observations :

GRAIN 1 :

Avant saut Cristal de sel vu sous 2 angles différents	Après saut 2 morceaux issus du grain initial
	

GRAIN 2

Avant saut	Après saut : 2 morceaux récupérés

Concernant le premier grain, on arrive sans difficulté à faire le lien entre les deux cristaux obtenus et le cristal initial. Comme on arrive à voir que les deux cristaux obtenus résultent d'une fission du cristal au niveau de la jonction entre les deux parties distinctes, cela semble confirmer le scénario envisagé, à savoir que la contrainte est forte au niveau de cette jonction.
Concernant le deuxième grain, le lien entre avant et après le saut n'est pas évident à voir. Nous ne voyons en effet pas particulièrement deux zones distinctes dans le grain de sel avant le saut. Peut-être alors que des défauts dans le cristal, non perceptibles, sont la cause de sa rupture à un endroit donné.
Nous avons poursuivi nos observations avec de nombreux cristaux, et globalement, nos observations vont dans le même sens lorsqu'on part de grains dans lesquels il est possible de distinguer différentes zones avec des directions de cristallisation différentes. Nous aurions aimé également pouvoir refaire un cristal bien transparent et de forme cubique pour voir si la notion de bloc est indispensable à l'apparition du phénomène. Mais à l'heure où on écrit le mémoire, nous n'avons pas réussi à en refaire.

Avant de passer à une observation plus étonnante, nous avons cherché des arguments qui pourraient confirmer le scénario auquel nous pensons pour expliquer le phénomène.

b – Une tentative de justification des hypothèses précédentes

Comme tous les matériaux, le sel est capable de se dilater lorsque sa température augmente. Cette dilatation peut d'ailleurs être calculée, car nous avons vu dans nos lectures, que le coefficient de dilatation à pression constante du sel est donné par la relation :

$$\beta = \frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$

Avec $\beta = 4 \times 10^{-5} K^{-1}$. On peut exploiter cela en faisant alors deux remarques : tout d'abord,

$$\frac{\Delta V}{V} = \beta \Delta T$$

Si on suppose que la température du sel s'élève de 500°C lorsqu'on le dépose sur la plaque qui est à cette température, alors le volume du grain de sel augmente de 2%.
Et compte tenu de la relation suivante,

$$\Delta V = V \beta \Delta T$$

Plus le volume du grain est important, et plus l'augmentation de volume le sera également. Par contre, on peut supposer que la dilatation du cristal se fait dans des directions qui dépendent des axes de la maille du cristal. Ainsi, lorsqu'un grain est composé de plusieurs blocs, on peut dire que l'augmentation de volume de chacun des blocs sera d'autant plus faible que le cristal sera globalement mal organisé. Ainsi, dans nos cristaux, les blocs étant relativement gros par rapport à ceux des cristaux du commerce, chaque bloc verra son volume augmenter de façon plus importante.

Or par ailleurs, les blocs se touchent entre eux, ils sont enchevêtrés les uns avec les autres. Autrement dit, lorsque le volume d'un bloc augmente, il pousse des blocs voisins. Nos avons alors cherché à quel point les cristaux de NaCl sont compressibles pour savoir s'ils peuvent résister à cette pression de la part des blocs voisins. Nous avons alors trouvé la relation suivante, qui montre le coefficient de compressibilité à une température donnée.

$$X = -\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T \Rightarrow -\frac{\Delta V}{V} = X \Delta P$$

Malheureusement, nous n'avons pas trouvé dans la littérature la valeur de X. Mais l'idée y est : on peut imaginer que pour des valeurs de X plus faibles qu'un certain seuil, les blocs ne sont pas assez compressibles pour que l'augmentation de volume due à la dilatation n'engendre pas l'éclatement du cristal.

Nous nous sommes dit qu'il pourrait être possible de vérifier ces hypothèses en refroidissant le sel. En effet, le fait que les blocs composant le grain de sel se compriment pourrait casse les liens entre les blocs qui composent le grain. On n'assisterait pas alors à un éclatement du grain, mais tout de même à quelque chose d'observable. Nous avons alors disposé des grains de sel sur une plaque à -18°C, sortie du congélateur, mais rien ne s'est passé, d'observable. Nous avons alors acheté de la carboglace pour placer su sel à -80°C. Nous l'avons mis dans un flacon fermé pour éviter la condensation de l'eau contenue dans l'air sur le grain de sel. Mais là encore, le grain de sel semble rester intact. Il est possible que -80°C ne soit pas suffisant pour que l'expérience puisse aboutir à quelque chose d'observable, car avec la carboglace, nous ne faisons finalement varier la température du sel que de 100°C.

Figure 13 : récipient contenant un grain de notre sel, à -80°C dans la carboglace

Cela est faible par rapport aux environ 500°C qu'on lui fait subir sur la plaque chauffante.

Remarque :

Juste une remarque car au fil de nos investigations, on pourrait croire qu'il y a des résultats qui pourraient être contradictoires dans tout ce que nous avons fait. Mais à notre avis, il n'en est rien, car d'une part, soit les conditions expérimentales ne sont pas identiques, soit les grains de sel avec lesquels nous avons travaillés n'ont pas la même origine.
Par exemple, au début du projet, nous observions que les grains sautaient, et que leur masse après le saut n'avait pratiquement pas changé, ce qui paraît contradictoire avec nos dernières observations. Mais le sel utilisé au début du projet était du gros sel commercial chauffé avec le chauffage du lycée (donc à relativement faible température), alors que le sel que nous utilisons dans ces toutes dernières expériences sont des grains bien structurés que nous avons réalisés, chauffés également au lycée. Le sel de Guérande était quant à lui du gros sel, mais chauffé au gaz de ville, chez nous.
Ainsi, le fait que le gros sel chauffé faiblement au lycée saute sans vouloir se casser peut provenir du fait que la température du chauffage engendre l'éclatement d'une toute petite partie du gros sel. La masse du grain de sel ne change donc pratiquement pas, mais le fait qu'une infime partie du grain de sel ait été éjecté peut provoquer le saut du gros grain de sel.
Le gros sel de Guérande éclate quant à lui jusqu'à devenir de petits grains car la température de chauffage permet cet éclatement.

2) Une observation qui pose question :

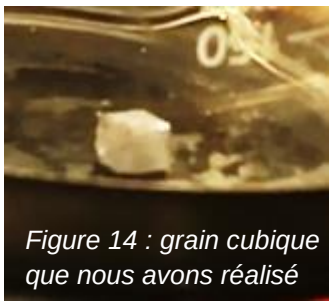


Figure 14 : grain cubique que nous avons réalisé

Nous avons remarqué que les cristaux de NaCl que nous fabriquons nous même sautent et cassent de façon plus violente que les gros grains de sel achetés dans le commerce. Avec le sel commercial, nous arrivions tout au plus, avec la plaque chauffante du lycée, à casser les grains en 2 parties identifiables. Mais la plupart du temps, on observait un simple saut sans pouvoir remarquer une partie du sel qui se détachait, même s'il y en avait probablement une. Or, la même expérience reproduite avec notre sel qui semble bien mieux organisé que le sel commercial explose de façon impressionnante, comme le montre la vidéo suivante. On y voit bien le grain de forme quasi cubique au départ (figure 14), contrairement aux formes plus chaotiques des grains de sel commerciaux : https://youtu.be/UG0W63XhgwI . C'est par hasard que nous avons pu constater à quel point nos grains de sel pouvaient ainsi se détériorer. En effet, nous avions placé un grain de sel entre deux coupelles afin de pouvoir récupérer les morceaux après le saut. Mais ce que nous avons vu fut totalement différent. En effet, du grain de sel, il ne restait plus que des paillettes de sel… Pendant l'opération on pouvait entendre le bruit du grain de sel crépiter contre les parois (entre les deux coupelles), puis au bout d'un moment il n'y avait plus de bruit. Le NaCl sous forme de grain s'était transformé en différentes minuscules particules.
Comme nous avons été étonné de voir notre sel se désintégrer avec une telle facilité, nous avons recherché la température minimale à laquelle notre sel pouvait casser. Et nous avons alors été très surpris de le voir sauter dès 110°C.

D'où provient l'étrange facilité de notre sel à casser ?

Comme nous voulions comprendre les différences étonnantes entre notre sel et le sel commercial, nous avons analysé le sel, en cherchant en particulier sa teneur massique.

Pour cela, nous avons réalisé une solution que nous avons préparé en dissolvant 0,87 gramme de notre sel dans 1L d'eau, et une autre solution en dissolvant 0,87g de sel commercial dans 1L d'eau. Puis nous avons réalisé un dosage conductimétrique de 200 mL de ces solutions diluées par un facteur 2, avec une solution titrante de nitrate d'argent de concentration 0,1 mol/L.

Voici les résultats obtenus :

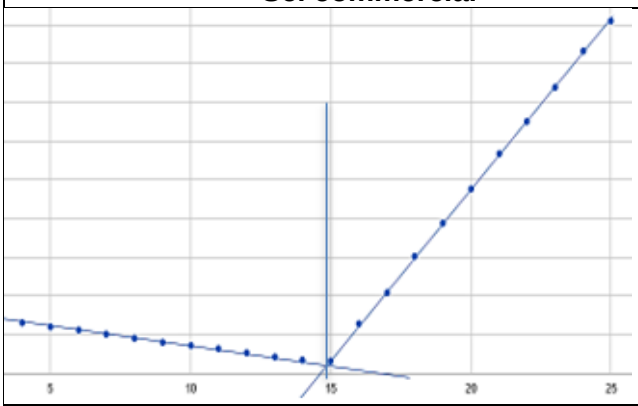
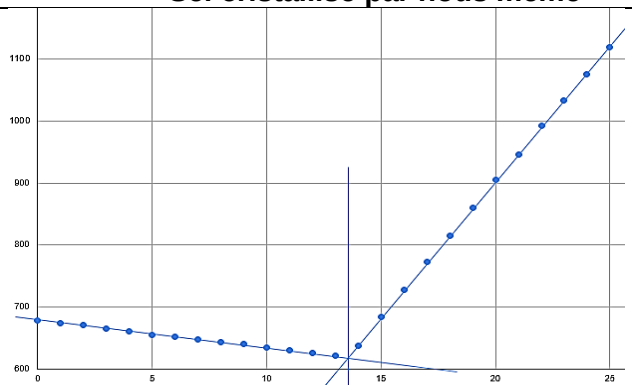
Sel commercial	**Sel cristallisé par nous même**
	
$V_{éq}$ = 14,9 mL	***$V_{éq}$ = 13,6 mL***
Teneur massique : 100%	***Teneur massique : 90,3%***

Figure 15 – Dosage conductimétrique du sel commercial et de notre sel pour déterminer leur pureté

Ces dosages ont été réalisés 2 fois, en préparant à chaque fois une nouvelle solution d'eau salée. Nous pouvons alors affirmer avec certitude qu'il existe une réelle différence de teneur massique entre le sel commercial, et notre sel, ce dernier état loin d'être pur. Cela pourrait alors bien être la raison pour laquelle notre sel a cette capacité à se casser à faible température, et de façon spectaculaire. Et dans ce cas-là, cela signifierait que les impuretés jouent un rôle majeur dans le phénomène observé. D'autant plus que certains cristaux que nous avons faits sautés sur la plaque étaient initialement de forme cubique, et ne semblaient pas résulter de blocs assemblés de façon désordonnés entre eux.
Peut-être alors y a-t-il plusieurs raisons au phénomène observé : les impuretés, et les assemblages de blocs.
Mais l'analyse des cristaux en termes de pureté soulève aussi des questions. En effet, nos cristaux paraissent mieux formés que le gros sel commercial. Cela voudrait dire que les impuretés avec lesquelles ont crû nos cristaux n'ont pas engendré de gros défauts de cristallisation. C'est étrange… Est-il possible que, même si le grain de sel paraît avoir une belle forme cubique, il puisse être constitué d'un ensemble de blocs ? Ou alors faisons-nous fausse route ? Et bien nous ne savons pas. Nous espérons trouver une réponse à cette question.

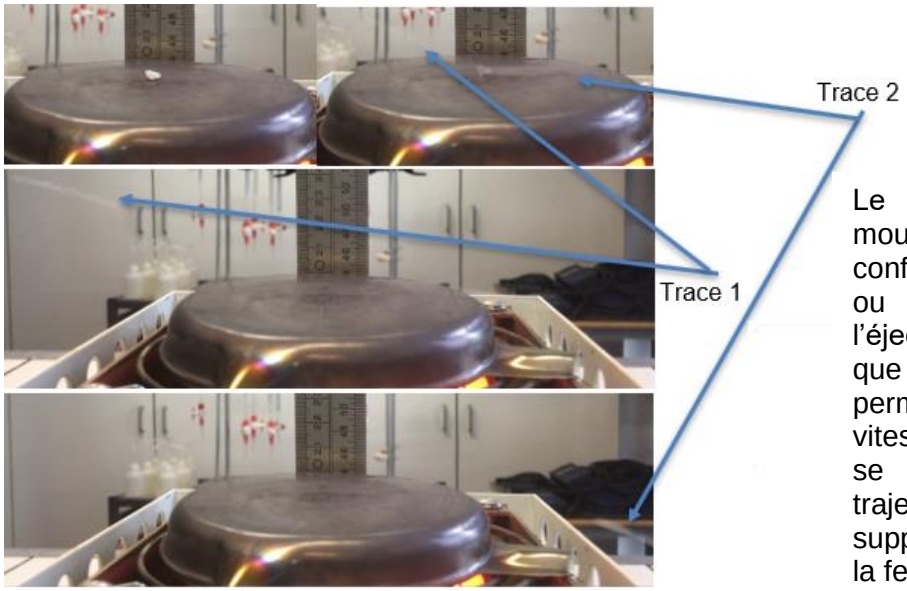
Toujours à la recherche de nouvelles pistes d'investigation, il nous est venue une idée pour tenter de mieux comprendre le phénomène observé :

3) Exploitation de la quantité de mouvement

En observant tout ce sel sauter, et se décomposer en éléments plus petits, nous avons repensé à une vidéo que nous avions prise, et que nous avions jusque là laissée de côté. Voici lien vers celle-ci, que nous avons ralentie pour bien voir ce qu'il faut noter :
Lien : https://youtu.be/uzKU1r7k5eE

On y voit en particulier un grain qui bouge, puis qui fini par éclater en au moins 4 parties identifiables.

Si on prend la scène image par image, on a du mal à repérer ces 4 morceaux de sel en question, mais nous tentons tout de même de les montrer ici :



Le fait d'exploiter la quantité de mouvement serait un moyen de confirmer que le saut du grain de sel, ou son éclatement, provient de l'éjection d'une partie de celui-ci. Il faut que nous montions une expérience qui permettrait de faire la mesure des vitesses et des masses des parties qui se sépareraient, sans que ces trajectoires ne soient perturbées par le support qui chauffe le sel. Nous avons la ferme intention d'y parvenir !

4) Une observation plus étrange.

Lors de l'expérience précédente, nous avons mis le sel dans une casserole en inox. Comme nous faisions des expériences chez nous, certains d'entre nous regrettaient de ne pas voir le sel sauter. Et finalement, en comparant ce que nous faisions, nous avons pu voir que la seule différence entre nos expériences était le récipient dans lequel nous faisions chauffer le sel. Il s'avère finalement que si on fait chauffer le sel dans un récipient avec un revêtement en Téflon, le sel saute beaucoup moins. Ce sont les dernières expériences que nous avons réalisées et nous n'avons alors pas assez de recul pour pouvoir discuter à propos de cela dans ce mémoire.

Nous avons juste eu le temps de voir la conductivité thermique du Teflon par rapport à celle de l'inox :

Pour l'inox, la conductivité thermique vaut 16,3 $W.K^{-1}.m^{-1}$. Pour le Teflon, la conductivité thermique vaut 0,25 $W.K^{-1}.m^{-1}$, soit, environ 65 fois plus faible que celle de l'inox. Nous n'avons pas encore eu le temps de bien exploiter ces données. Cela fait partie du travail qu'il nous reste à faire.

Conclusion :

Nous nous sommes lancés un véritable défi : celui de comprendre l'origine du saut du sel soumis à de fortes températures. Nous avons tenté d'aborder cette problématique sous différents angles, car les indices nous manquaient pour pouvoir établir un scénario responsable du saut du grain de sel. Certaines hypothèses dans un premier temps éliminées, puis refaisant leur apparition avant d'être une nouvelle fois éliminées montrent à quel point il a été délicat d'approcher la solution de façon certaine. Mais nous essayons de faire tout ce que nous pouvons, en menant une démarche qu'on essaie de maintenir rigoureuse pour que nos conclusions soient crédibles.

Il est intéressant de voir que nos hypothèses et conclusions ont pu à ce point varier au cours de ce projet, car cela fait rappeler que les recherches que nous avons faites ont dépendu à la fois de l'avancée de nos connaissances, mais également du matériel que nous avions à disposition pour faire nos investigations. Le phénomène est-il dû à un assemblage de bloc dans un grain ? A des impuretés ?

Notre projet n'est pas fini et nous aurons à cœur de le poursuivre. Nous devons poursuivre nos observations d'une part, mais nous avons aussi d'autres pistes d'investigation. Par exemple, nous souhaiterions utiliser la conservation de la quantité de mouvement lors de l'éclatement d'un grain de sel pour mener des investigations plus poussées. Et c'est ce que nous nous efforcerons à faire par la suite.