



Taffonisation

Club Sciences du Lycée Jeanne d'Arc Bastia

BELINE Timon (T^{le})

BODSON Tia, DARY Jean-Antoine (2^{de})

GEIGER Jules, HASSAM ISMAIL Ugo (1^{re})

MONTAGGIONI Dorothée (Professeur SVT)

PIACENTINI Joseph (Professeur Physique-Chimie)



Sommaire

Présentation de l'équipe	page 3
I. Introduction	page 4
II. Découvrir le site	page 5
III. Caractériser l'action du gel et du dégel	page 6
IV. Caractériser les conditions atmosphériques sous le rocher	page 8
V. Caractériser l'action du sel marin	page 10
VI. Conclusion	page 16
VII. Annexes	page 17
VIII. Bibliographie	page 25
IX. Remerciements	page 25

Equipe Taffonisation



Timon Beline

Elève de Terminale. Lors de notre expédition en Alta Rocca, ma participation s'est caractérisée par un travail de photogrammétrie afin de mieux rendre compte de l'objet de notre étude. Passionné par l'aéronautique et très intéressé par la mécanique des fluides, c'est avec enthousiasme que J'ai réalisé une simulation 2D de l'évolution de l'air sous le rocher avec l'aide d'un ancien élève du Club Sciences.



Ugo Hassam
Ismail

Elève de première. Dans le cadre de notre projet, je me suis intéressé à la caractérisation de l'action du sel marin dans le délitement des roches. Mon travail s'est articulé autour de deux tâches principales : la première a consisté en la mise en évidence de la présence de sel dans la cavité, alors que la seconde m'a permis de m'investir dans la compréhension de la pression de disjonction et des forces électrostatiques au sein de la lame nanométrique en sursaturation, responsables de la détérioration des roches.



Jean Antoine
Dary

Elève de seconde. J'ai contribué à ce projet en concevant un Rover capable de scanner la cavité sous le rocher et le logiciel permettant d'en obtenir une représentation en trois dimensions sous la forme d'un nuage de points. J'ai également traité les données issues de capteurs enregistreurs de température et d'hygrométrie, placés pendant une année à côté et dans la cavité, afin de déterminer l'existence éventuelle d'un microclimat sous le rocher.



Jules Geiger

Elève de première. Dès le début du projet, mon intérêt s'est porté sur la quantification des forces mises en jeu par l'action du gel/dégel ainsi que sur celles créées par la présence de sel dans la cavité que nous avons étudiée. Ce sujet m'a tout de suite passionné car il rassemble deux disciplines que j'apprécie tout particulièrement : les mathématiques et la physique. La partie expérimentation m'a aussi beaucoup attiré de par la démarche de recherche que nous avons entreprise.



Tia Bodson

Elève de seconde. Dans ce projet j'ai cherché à comprendre et à expliquer les pressions et les forces mises en jeu lors de l'action du gel/dégel. L'utilisation d'un manomètre électronique, d'un capteur résistif puis d'un capteur piézoélectrique relié à un microcontrôleur Arduino ont été nécessaires.

Taffonisation

I. Introduction

Il y a quelques années, des élèves du Club Sciences de notre établissement s'étaient intéressés à un énorme rocher oscillant de près de 45 tonnes qu'un enfant pouvait mettre en mouvement. L'an passé, nous avons décidé de partir en montagne, découvrir cet environnement particulier.

Nos pérégrinations au milieu de ce chaos granitique nous laissent observer un paysage étonnant, véritable bestiaire de rochers sculptés (Fig.1)



Fig.1 : Rochers observés sur le plateau du Coscione. Hautes Terres de l'Alta Rocca.

Les roches présentes ici montrent des cavités de toutes tailles qui semblent s'être creusées par en dessous. Dès la préhistoire les taffoni¹ ont été occupés, fermés par des branchages ou des murets de pierres sèches (Fig.2).



Fig.2 : Elèves du Club Sciences abrités dans un taffonu ouvert.

Un des rochers a attiré notre attention. Ce n'est pas le plus gros ni le plus spectaculaire, mais sous un certain angle il ressemble à un chapeau de Napoléon. Posé sur un sol de granite, ses appuis réduits peuvent laisser penser qu'il est en lévitation. Une fissure d'une dizaine de centimètres l'éloigne du sol et une ouverture circulaire laisse entrevoir une large cavité creusée sous le rocher. Cependant, impossible de s'y glisser (Fig.3).

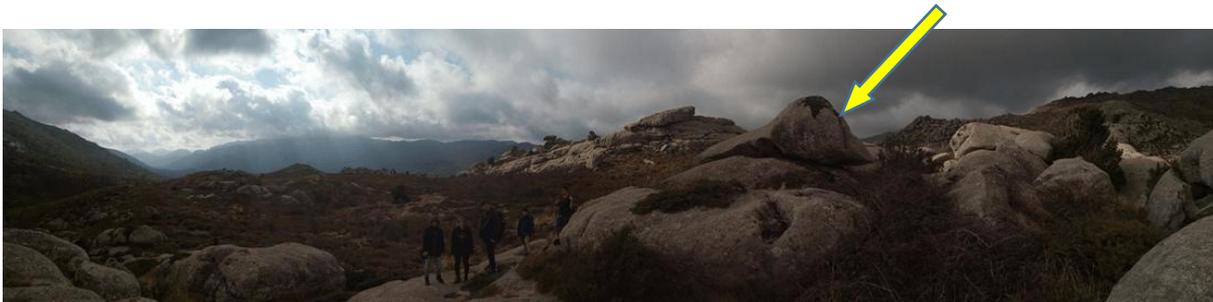


Fig.3 : Vue du paysage. La flèche positionne le rocher avant fait l'objet de notre étude.

Comment expliquer la formation de telles cavités sous ces blocs aux formes arrondies ?

¹ Le mot « taffoni » désigne le terme géologique qui décrit ce phénomène étrange à première vue de roches qui se creusent par en-dessous. - Corse Matin, « Taffoni et Orii, la pierre et ses mystères à Roccapina » - <https://www.corsematin.com/article/sartene/taffoni-et-orii-la-pierre-et-ses-mysteres-a-roccapina>

Le géologue Alain Gauthier expliquait lors de la journée du patrimoine : « La taffonisation est due à 4 malfaiteurs : le vent qui transporte les embruns, la pluie qui fait ruisseler l'eau salée dans les failles de la roche, le soleil qui cristallise le sel et enfin le sel lui-même qui fait éclater le granite, dissociant ses grains de quartz, feldspaths et micas »².

Ces affirmations nous interrogent et on se demande si le froid n'aurait pas aussi un rôle à jouer dans ce paysage de montagne. Plusieurs hypothèses sont envisagées.

Cette érosion particulière pourrait-elle être expliquée par l'action du gel et du dégel, mais un microclimat plus froid règne-t-il sous ce rocher au point d'écailler sa surface ?

Cette érosion particulière pourrait être expliquée par la cristallisation du sel marin, mais du sel marin peut-il être déposé sous ce rocher situé à 1300 m d'altitude et 30 Km de la mer, dans une anfractuosité aussi protégée ? Ce sel en cristallisant exerce-t-il des forces pressantes qui disloqueraient le granite ?

Notre enquête sur la taffonisation est lancée !

II. Découvrir le site

La cavité sous le rocher étant quasi inaccessible, nous avons imaginé utiliser un Rover Arduino télécommandé, équipé d'une tourelle montée d'un dispositif sonar ultrason. Le dispositif pourrait emprunter l'étroite fissure, rouler sous le rocher, balayer la cavité d'ultrasons et en donner une image en 3 dimensions sous la forme d'un nuage de points. (Fig.4) (Voir Annex

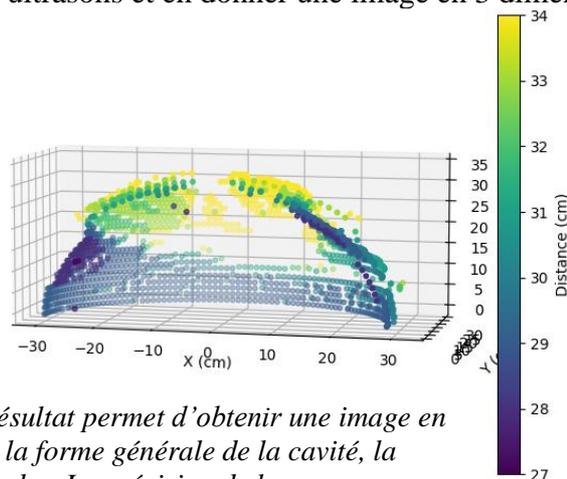


Fig.4 : Une maquette pour tester le Rover Arduino. Le résultat permet d'obtenir une image en 3D caractérisée par un nuage de points. Si on reconnaît la forme générale de la cavité, la mesure des distances montre parfois de grandes incertitudes. La précision de la mesure dépend de l'angle d'incidence de l'onde et de la distance entre l'émetteur et l'obstacle.

Cependant, contraints par le choix d'une bonne fenêtre météo, nous optons pour une option plus facile à mettre en œuvre, utilisée en archéologie ou en architecture, la photogrammétrie (Fig.5). De nombreuses photographies sont réalisées, les données sont exploitées à l'aide du logiciel Polycam et une image numérique est obtenue³.



Fig.5 : Timon, photographant le rocher à l'aide de son téléphone portable. 604 photographies ont été réalisées pour modéliser l'extérieur du rocher, 512 photographies ont été réalisées pour modéliser l'intérieur du rocher.

² Corse Matin, « Taffoni et orri, la pierre et ses mystères à Roccapina » - <https://www.corsematin.com/article/sartene/taffoni-et-orri-la-pierre-et-ses-mysteres-a-roccapina>

³ <https://youtube.com/shorts/4pHsVgBIYBc?si=dZbbTPLDnhfnkVrQ> - Un lien pour visualiser l'animation obtenue.

III. Caractériser l'action du gel et du dégel

1. Des expériences pour mettre en évidence le phénomène

Dans l'immense majorité des cas, l'état solide d'un corps, où les molécules sont plus ordonnées, occupe moins de place que l'état liquide. Pour l'eau, c'est l'inverse⁴. Ainsi, nous avons tous entendu des histoires sur des bouteilles éclatées parce qu'elles avaient été oubliées au congélateur.

Mais le phénomène est-il identique lorsque une bouteille d'eau en verre est fermée, ouverte, ou à moitié pleine ?

Nous avons sollicité Mr. Salge Simon, maître artisan glacier à Saint Florent, qui nous a autorisé à utiliser sa chambre froide réglée à -25°C pour réaliser notre expérience.

La bouteille pleine et bouchée a éclaté : la formation de glace génère une augmentation de pression dans la bouteille qui éclate. Comme on peut observer que le bouchon a été poussé par la glace, on suppose que la pression a été relativement forte. La bouteille pleine et ouverte a également éclaté : elle montre la formation d'un bouchon de glace qui a conduit au même résultat. On suppose que cette situation est celle qui illustre le mieux la dégradation à la surface du rocher par l'action du gel et du dégel. Par contre, la bouteille à demi-pleine a résisté : la glace s'est développée vers le haut et les contraintes latérales, si elles existent, ne sont pas mises en évidence (Fig.6).

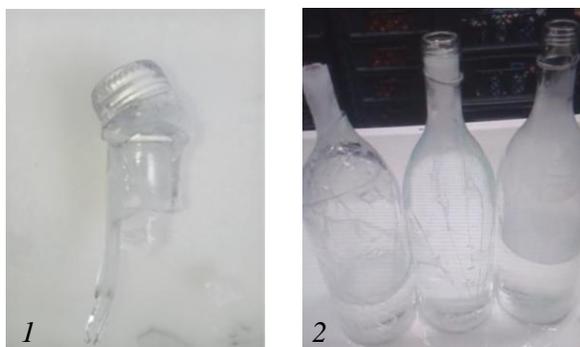


Fig.6 : Observations des bouteilles de verre placées à -25°C .
1 : Bouteille pleine et bouchée montrant le déplacement du bouchon poussé par la glace.
2 : Bouteille pleine et bouchée, bouteille pleine et ouverte, bouteille à moitié pleine et ouverte.
Les bouteilles pleines ont éclaté alors que la bouteille à moitié pleine est restée intacte.

Des forces pressantes semblent donc exister, mais comment les mesurer ?

2. Des expériences pour mesurer les forces pressantes mises en jeu

Notre première idée, basée sur les observations du bouchon soulevé, consiste à réaliser plusieurs mesures de pression. Un manomètre électronique est relié au bouchon percé d'un tube à essais contenant de l'eau et plongé dans un mélange réfrigérant constitué de glace pilée et de chlorure de sodium. Ce dispositif nous permet de vérifier que la variation de pression de l'air au-dessus du volume d'eau prenant en glace augmente avec la masse d'eau, mais dépend également du volume d'air emprisonné au-dessus de l'eau.

Une autre série de mesures est effectuée à l'aide d'une balance électronique supportant une masse reposant sur un plateau soulagé par la poussée de la glace en expansion dans un tube à essais. Mais ce dispositif ne nous donne pas non plus satisfaction.

Ces différents protocoles (Voir Annexe 2) posent problème et nous réalisons finalement que nous avons fait fausse route : il nous faut mesurer la pression de l'eau qui fait éclater la bouteille lorsqu'une partie de cette eau prend en glace dans un volume fini.

Notre deuxième idée consiste à réaliser plusieurs mesures de résistances. Un capteur résistif, constitué d'une résistance déformable au sein d'un film plastique, est relié à un ohmmètre et placé dans une bouteille avec de l'air sous pression croissante (Fig.7). Comme nous n'observons aucune variation, nous supposons que les actions pressantes s'exerçant à l'identique sur les deux faces du capteur ne produisent pas sa déformation.

⁴ <https://www.futura-sciences.com/sciences/questions-reponses/molecule-glace-prend-elle-plus-place-eau-liquide-7327/> -

Portail d'information multidisciplinaire, animé par une équipe de journalistes couvrant 5 domaines de l'actualité : santé, sciences, maison, tech et planète.

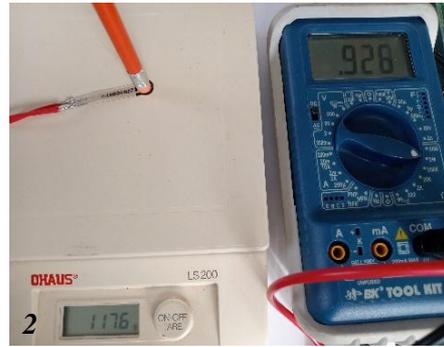


Fig.7 : Dispositif utilisant le capteur résistif. 1 - Le capteur résistif est constitué d'une piste métallique emprisonnée dans un film plastique.

2 - La gomme au bout du crayon déforme le capteur couché sur le

plateau d'une balance électronique. La masse affichée par la balance est en rapport avec l'action et la pression exercées sur le capteur. L'ohmmètre affiche la résistance du capteur qui diminue lorsque la valeur de l'action mécanique sur le capteur augmente. 3 - Le bouchon d'une bouteille est équipé d'une valve afin de pouvoir mettre l'air intérieur sous pression, à l'aide d'une pompe à vélo. Le capteur est scotché sur la paroi interne de la bouteille. Aucune variation de résistance n'est observée, alors que la pression de l'air augmente jusqu'à 8 bar. Les forces pressantes s'exerçant de la même façon sur les deux faces, le capteur ne se déforme pas.

Arduino (Fig.8) : la tension de sortie du capteur est ici proportionnelle à la pression du liquide dans lequel il est plongé. Alimenté en 5 Volt, une tension de sortie de 0,5V correspond alors à une pression de 1 bar.

Fig.8 : Spécifications du capteur piézoélectrique.

Marque : Yosoo Health Gear

Dimensions : L = 10mm ; l = 10mm ; H = 10mm

Matériau : Acier inoxydable

Tension : DC 5 V

Pression : 150 psi

Précision : à 2 % de la lecture (pleine échelle).

Câblage : rouge pour + 5 V ; Noir pour le sol ; Bleu pour la sortie du signal.

Sortie : sortie de tension linéaire de 0,5 V ~ 4,5 V.

Précision : à 2 % de la lecture (pleine échelle).

Capacité de surcharge : 2 à 4 fois la pression nominale

Température de fonctionnement : - 40°C ~ +120°C.

Température de compensation : 0°C ~ +80°C

Classe de protection : IP67

Support d'impression : pétrole, gaz et eau, compatible avec l'acier inoxydable 316L



Une bouteille en verre ouverte contenant le capteur de pression plongé dans un litre d'eau, est placée à -18°C dans le congélateur de la cantine du lycée. Après environ 5 heures (Fig.9) nous observons que la tension en sortie, image de la pression mesurée, augmente lentement et qu'un bouchon de glace s'est formé dans le goulot. Cependant la pression chute brusquement et nous entendons simultanément le bruit d'une fuite. À quatre reprises, sous l'effet de la pression, le bouchon de glace a laissé échapper une giclée d'eau, avant que la fuite ne soit colmatée par le gel. Après environ 1160 secondes nous observons une brusque augmentation de pression, certainement expliquée par la prise en glace d'une partie de l'eau en surfusion. Le bouchon de glace cède encore, et nous ne tardons pas à mettre fin à l'expérience, la pression de l'eau dans la bouteille étant supérieure à la valeur limite de 10 bar que l'on peut mesurer avec ce capteur. A cet instant, la bouteille n'est toujours pas cassée. Il nous faudrait disposer d'un capteur offrant une plage de mesure plus grande pour mesurer la pression de l'eau qui fracture le verre de la bouteille.

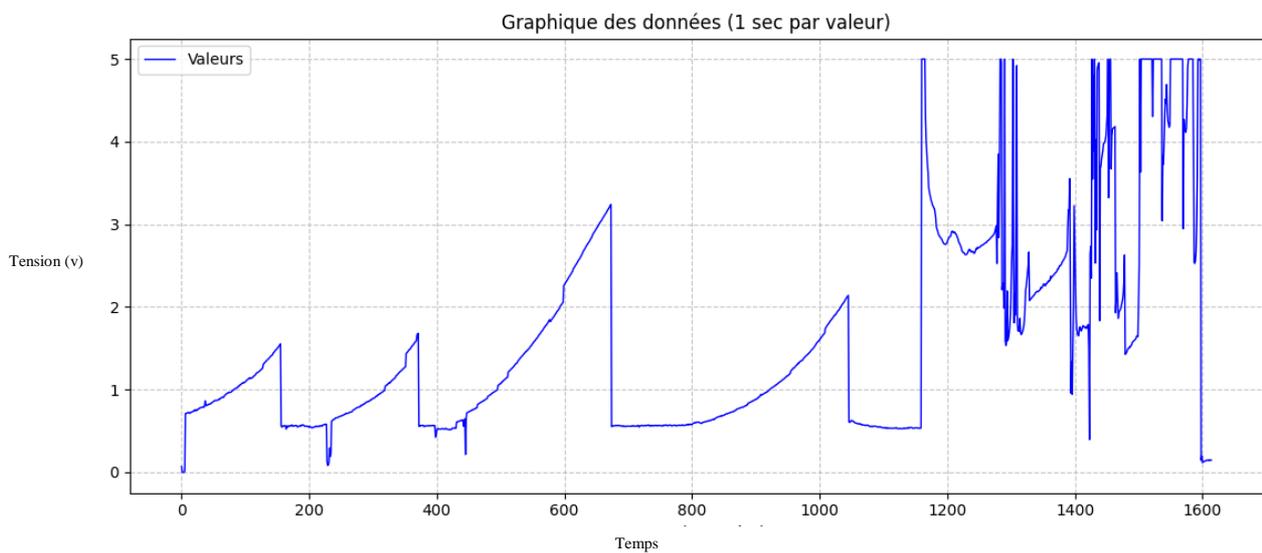


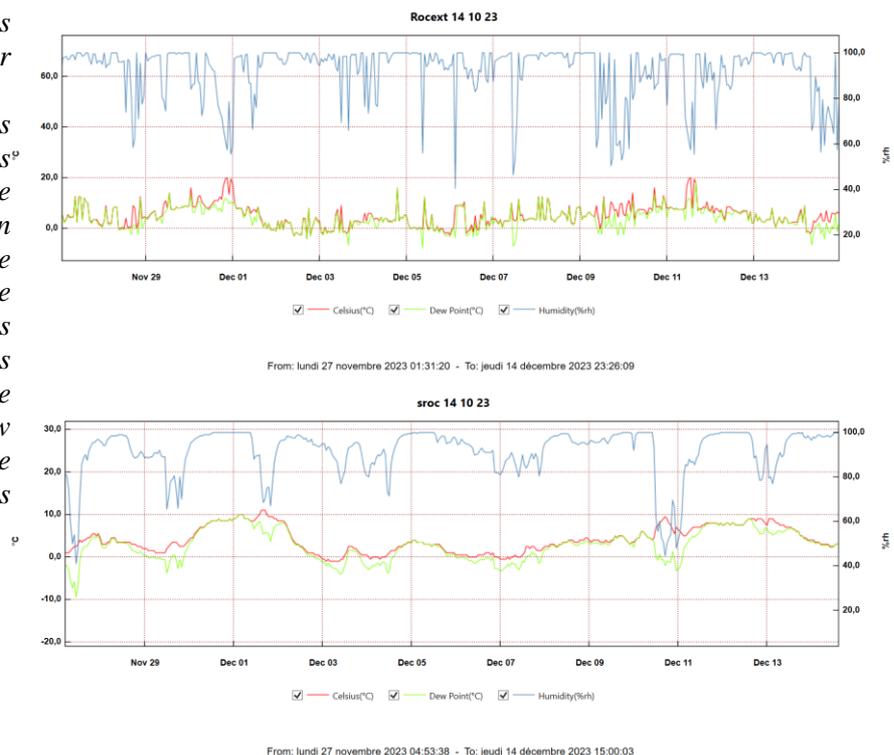
Fig.9 : Evolution de la tension en sortie du capteur en fonction du temps. La tension mesurée est l'image de la pression de l'eau à l'intérieur de la bouteille. 1V = 2bar. Les données affichées correspondent à celles relevées après 5h à -18°C.

Ainsi, même si nos expériences ne sont pas toutes abouties, on peut admettre que les pressions mesurées lors de la prise en glace de l'eau dans un volume fini peuvent atteindre des valeurs importantes susceptibles de générer des désordres dans la structure de la roche.

IV. Caractériser les conditions atmosphériques sous le rocher

À l'automne 2023 nous avons caché deux capteurs enregistreurs de température et d'hygrométrie. L'un à côté du rocher, accroché sur une branche de bruyère, l'autre dans la cavité. Les capteurs avaient été paramétrés afin d'enregistrer la température et l'hygrométrie toutes les heures. Nous les avons retrouvés lors de notre nouvelle expédition cet automne 2024. Une fois les données récupérées, nous les avons traitées à l'aide un programme Python (Fig.10). (Voir Annexe 3).

Fig.10 Haut : Traitement des données issues du capteur positionné à coté du rocher ; Bas : Traitement des données issues du capteur positionné sous le rocher. La courbe rouge montre l'évolution de la température en fonction des jours, la courbe bleue montre l'évolution de l'hygrométrie en fonction des jours. L'hygrométrie est au plus haut lorsque la température de l'air atteint le point de rosée (Dew point), moment où la vapeur se liquéfie et forme la rosée sur les végétaux et/ou la roche.



Comme nous avons imaginé que l'action du gel et du dégel était le principal moteur de cette érosion spectaculaire, nous nous sommes focalisés sur les jours de grand froid en négligeant les nombreuses variations d'hygrométrie. Toutefois, nous sommes surpris par le faible nombre de jours où la température de l'air est descendue en dessous de 0°C, à 1300 m d'altitude au centre de la Corse : 5 jours seulement. Cependant, la comparaison des données obtenues sous le rocher et à côté de celui-ci laisse penser qu'un microclimat peut exister sous ce rocher. S'il ne fait pas toujours plus froid en hiver sous le rocher (Fig.11) l'évolution des grandeurs atmosphériques enregistrées semble être « lissées » dans la cavité (Fig.12) laissant apparaître moins de variations des paramètres atmosphériques sous le rocher qu'en dehors.

Date et heure	Température extérieure	Température sous rocher
19 janv 2024 ; 7h40	-3,0°C	5°C
21 janv 2024 ; 0h40	6,0°C	-2°C
22 janv 2024 ; 6h05	-0,5°C	0,5°C

Fig.11 : Quelques températures enregistrées. Les données obtenues ne permettent pas d'affirmer qu'il fait toujours moins froid sous le rocher.



Fig.12 Haut : Traitement des données issues du capteur positionné à côté du rocher ; Bas : Traitement des données issues du capteur positionné sous le rocher. Une observation sur une semaine permet de confirmer les faibles variations de température et d'hygrométrie sous le rocher.

Ainsi, plus que l'action du gel et du dégel, une plus grande inertie de la température et de l'hygrométrie pourrait expliquer cette curieuse érosion.

V. Caractériser l'action du sel marin

1. Des expériences pour mettre en évidence la cristallisation

À l'image de l'eau qui prend en glace et exerce une action pressante sur son contenant, on s'est posé la question de savoir si du sel ou du sucre qui cristallise dans un tube à essais peut entraîner l'éclatement. Nous avons mis dans des tubes à essais et des boîtes de pétri des solutions saturées, sucrées et salées, que nous avons laissées durant plusieurs semaines à température ambiante. Nous avons pu observer que toute l'eau ne s'évapore pas et que la cristallisation est différentes : alors que les cristaux de sucre se forment dans les contenants et y restent, les cristaux de sel semblent « s'en échapper » (Fig.13)



Fig.13. : La cristallisation du sel et du sucre. Les cristaux de sel ont tendance à migrer hors de leur contenant, alors que les cristaux de sucre ne montrent pas ce phénomène.

Les résultats observés nous ont longuement interrogés. La porosité de la structure de chlorure de sodium pourrait-elle être une explication ?

2. Des expériences pour mettre en évidence la présence de sel marin

Lors de notre première expédition, en même temps que les capteurs de température et d'hygrométrie, nous avons placé dans l'anfractuosités deux « pièges à sel », constitués de deux pots en verre collés sur un caillou plat. Un des deux pots était ouvert en direction du plafond de la cavité, l'autre était surmonté par son couvercle décollé d'un centimètre pour ne collecter que ce qui serait apporté par le flux d'air horizontal (Fig.14).



Fig.14 : « Piège à sel ». Les deux pots en verre sont placés sous le rocher afin de récolter le dépôt présents dans la cavité.

Après avoir récupéré les « pièges », nous avons décollé les dépôts du fond des pots et les avons dissouts avec un peu d'eau distillée. Des gouttes de cette solution ont été déposées sur une lamelle de verre en vue d'une observation microscopique. Après évaporation, si des cristaux de chlorure de sodium sont présents, ils devraient cristalliser.

Nous avons sollicité Mr. Quilichini Yann, ingénieur de recherche au laboratoire UMR CNRS Sciences Pour l'Environnement (SPE) de l'Université de Corse, qui est responsable du microscope électronique à balayage (MEB).

Notre échantillon est expertisé et comparé à une préparation témoin réalisée avec quelques gouttes d'eau de mer. Un ciblage sur la lamelle de verre est aussi réalisé pour vérifier sa composition et confirmer qu'elle ne peut induire d'erreur d'interprétation (Fig.15).

L'oeil expert de Mr. Quilichini permet d'identifier que notre échantillon contient des pollens, le ciblage des cristaux observés dans l'échantillon (Fig.16) montre la même signature que ceux observés pour le témoin d'eau de mer (Fig.17), ce qui nous permet de confirmer la présence de chlorure de sodium. Le ciblage de

la lamelle de verre ne révélant aucune présence de chlorure permet d'envisager l'origine de ce chlorure de

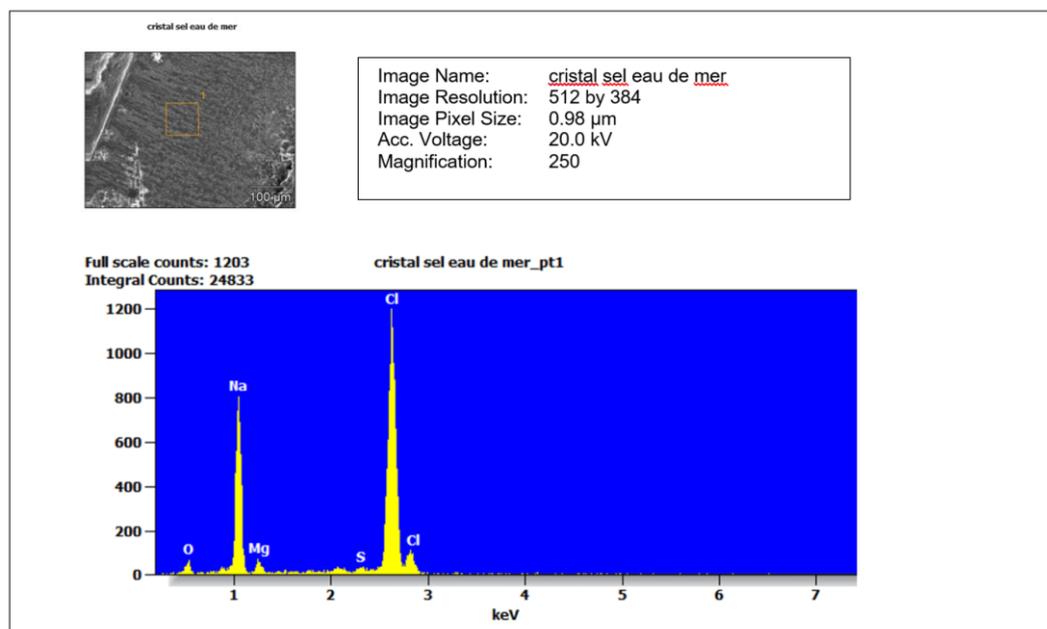


Fig.16 : Résultat d'analyse de la lamelle témoin, contenant de l'eau de mer. Le criblage des cristaux révèle la présence d'ions Na (sodium) et Cl (chlorure) qui permettent d'identifier les cristaux de sel (NaCl).

sodium

Ainsi, l'analyse réalisée à l'Université de Corse confirme la présence, dans cette cavité sous rocher, de sel qui semble être marin.

De plus, en nous basant sur la publication Wikipédia⁵, « La composition chimique moyenne du granite est : 74,5 % de SiO₂, 14 % de Al₂O₃, 9,5 % de (Na₂O, K₂O), 2 % d'autres oxydes (Fe, Mn, Mg, Ca) » on peut admettre que si l'élément sodium entre bien dans la composition du granite et pourrait être issu ce celui-ci, l'élément chlore est absent de la roche et ne peut provenir que d'un apport extérieur.

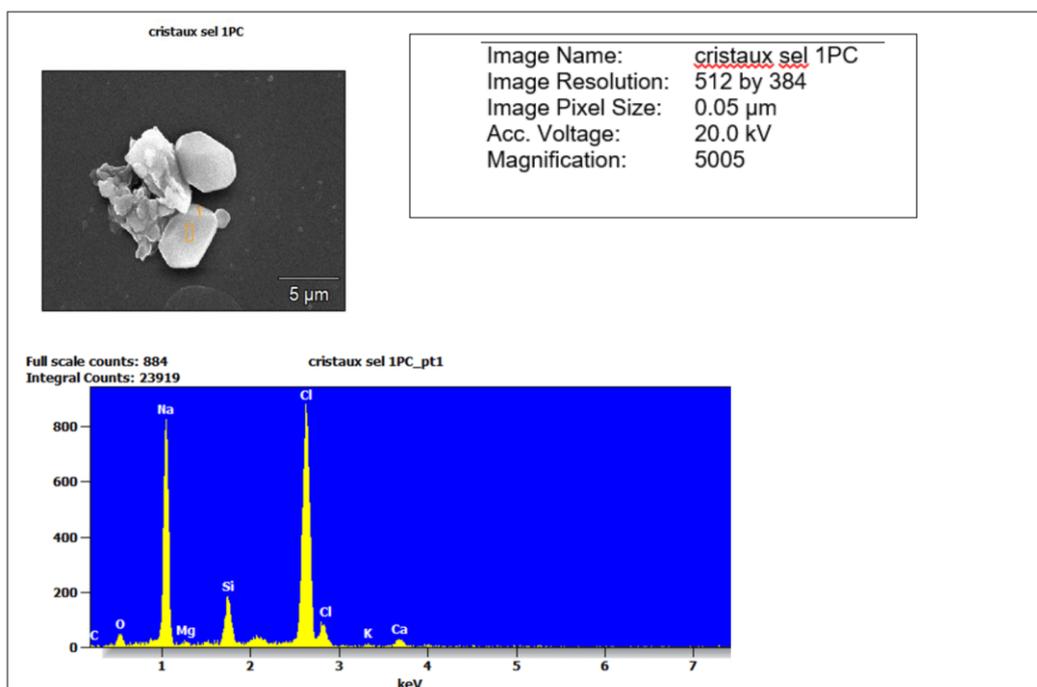


Fig.17 : Résultat d'analyse de notre échantillon. Le criblage des cristaux révèle la présence d'ions Na (sodium) et Cl (chlorure) qui permettent d'identifier ces cristaux de sel.

⁵<https://fr.wikipedia.org/wiki/Granite#> - Le granite.

3. Des expériences pour expliquer le dépôt de sel marin au sommet de la cavité

Nous avons d'abord imaginé une maquette permettant de modéliser la circulation de l'eau dans le rocher. Nous avons réalisé un profil de la cavité en « plexiglas » sur le principe d'un empilement de trois plaques. Mr. Bandini Gérard, de l'association OPRA à Bastia, nous a expliqué le fonctionnement de la machine découpe-laser que l'on a pu utiliser pour donner forme aux 3 plaques que l'on a assemblées à l'aide de vis papillon. De retour au lycée, après avoir relié la maquette à un robinet, nous étions prêts à observer le mouvement de l'eau au sein de la cavité. Pour rendre le phénomène facilement observable nous avons injecté, par la cheminée, du colorant alimentaire bleu (*Fig.18*)

Cependant, la mise en fonctionnement n'est pas si simple. Il faut être capable de gérer les coups de bélier dans la canalisation, les fuites au niveau de l'entrée d'eau, la pression d'eau afin qu'elle ne repousse pas le colorant vers le haut et une bulle d'air très difficile à éliminer de la cavité. On se propose alors d'immerger la maquette dans un aquarium ce qui permet de résoudre le problème et de visualiser le trajet de l'eau⁶.

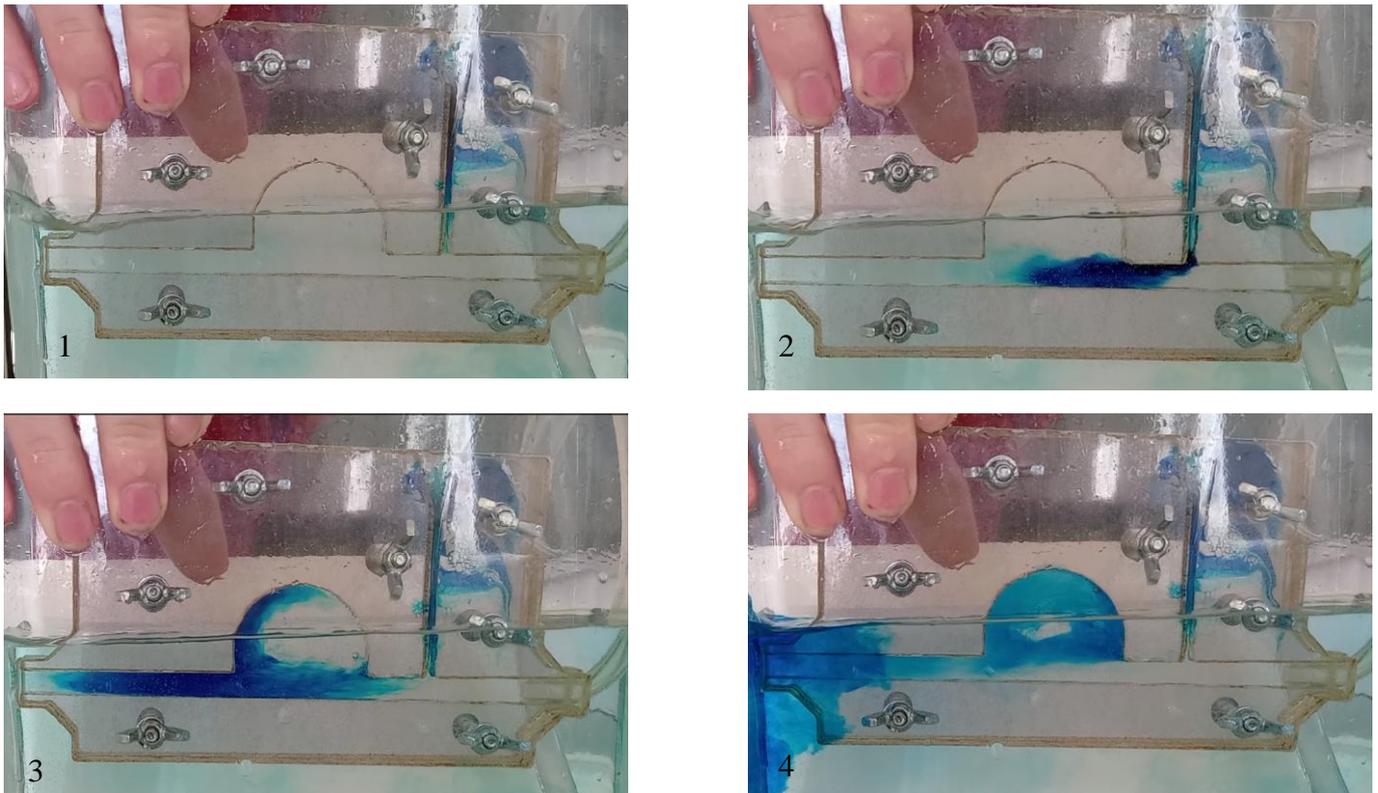


Fig.18 : Maquette permettant de modéliser le mouvement du fluide dans la cavité. Du colorant injecté par la cheminée montre l'existence d'un tourbillon.

Si le vent dans la cavité se comporte comme ce courant d'eau nous pouvons imaginer que des embruns peuvent être déposés au plafond de la cavité sous rocher.

Cependant, comment confirmer que l'air se comporterait dans une cavité bien plus grande comme l'eau dans cette petite maquette ?

Pour cela, nous avons contacté un ancien élève du club Sciences, Mr. Nikolaev Mikhail qui est ingénieur et passionné de mécanique des fluides. Lors d'une visioconférence il nous a expliqué le fonctionnement du logiciel de simulation ANSYS ce qui nous a permis d'obtenir une modélisation du flux d'air circulant dans la cavité à échelle réelle (*Fig.19*)⁷.

⁶ https://youtube.com/shorts/ApOUyQ_9GUY?feature=share - Vidéo de l'expérience réalisée montrant le trajet de l'eau dans la maquette.

⁷ <https://youtu.be/Unjfi-4zUuc> - Vidéo de la modélisation du trajet de l'air dans le rocher

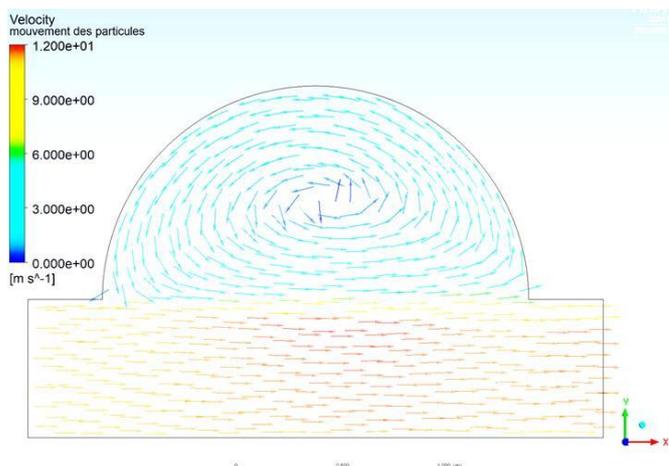


Fig.19 : Modélisation réalisée à partir du logiciel ANSYS. Les vecteurs vitesse rendent compte du mouvement du fluide.

Cette démarche de simulation avec le logiciel ANSYS nous permet de confirmer le dépôt possible d'embruns marins au plafond de la cavité.

4. Des expériences pour mesurer la pression de cristallisation

Nos recherches menées sur le net nous ont permis de découvrir un article retraçant « un entretien avec Julie Desarnaud sur la cristallisation des sels »⁸ traitant de l'effet des sels sur les matériaux de construction en lien avec la dégradation des monuments.

Mme. Desarnaud travaille actuellement en Belgique à l'IRPA (Institut Royal du Patrimoine Artistique) au sein d'un laboratoire dédié à la préservation des monuments et des œuvres d'art. Nous décidons de contacter cette scientifique. Elle accepte très volontiers et nous propose une visioconférence.

Lors de sa thèse⁹, Mme. Desarnaud a infirmé la notion de pression de cristallisation et l'idée qu'en cristallisant, les sels comme le chlorure de potassium, exerceraient des actions pressantes au niveau des micro-fissures dans lesquelles l'eau salée se serait infiltrée par capillarité¹⁰.

Essayer de mesurer une force pressante lors de la cristallisation de chlorure de sodium est donc peine perdue.

Mme. Desarnaud nous suggère de réaliser des prélèvements par forages de 1 cm de profondeur sur les blocs de granite afin de quantifier la quantité de chlorure de sodium présente sur les parois de granite.

Un prélèvement a été réalisé sur une partie sommitale exposée à la pluie, le second au plafond d'une cavité accessible. Le tout est envoyé en Belgique.

L'analyse des échantillons a permis d'en déterminer leur composition (Fig.20)

Localisation	Anion			Cation				Total
	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	
Sur le Rocher	0.18%	0.27%	0.03%	0.13%	0.09%	0.17%	0.06%	0.93%
Sous le rocher	0.01%	0.02%	0.02%	0.00%	0.01%	0.03%	0.00%	0.09%

Fig.20 : Résultat d'analyse de nos échantillons par chromatographie ionique, exprimés en pourcentage massique de matière sèche. On peut remarquer que la quantité de chlorure de sodium (NaCl) sur le rocher est d'environ 10 fois supérieure à celle sous le rocher. On peut également noter que d'autres sels sont présents.

⁸ <http://doc.lerm.fr/entretien-avec-julie-desarnaud-sur-la-cristallisation-des-sels/> - « Entretien avec Julie Desarnaud sur la cristallisation des sels » - Site documentaire du Lerm, laboratoire Indépendant & Expertise Qualité du groupe Setec, entreprise d'ingénierie pluridisciplinaire française.

⁹ [Mécanisme de croissance et dissolution de cristaux de KCl sous charge : Apport dans la connaissance des mécanismes d'altération des pierres par les sels - TEL - Thèses en ligne \(hal.science\)](#) - Thèse 2009 - Julie Desarnaud.

¹⁰ « En aucun cas, le monocristal de KCl ne développe de pression de cristallisation. Il semble improbable qu'un cristal du type KCl puisse dégrader une pierre en exerçant par pression de cristallisation » - Extrait issu du résumé de la thèse de Julie Desarnaud.

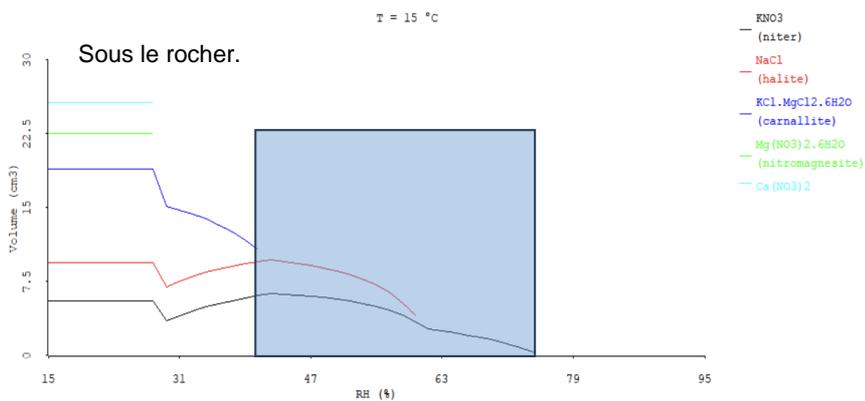
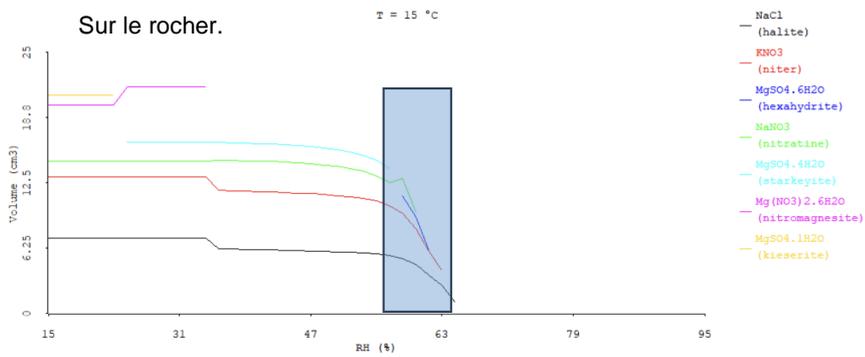


Fig.21 : Variations du volume de sel cristallisé en fonction de l'hygrométrie.

Sur le rocher : Les représentations cumulées montrent que les sels les plus abondants sont NaCl et KNO₃. La plupart des sels vont cristalliser à une humidité comprise entre 55% et 63%. Si l'humidité relative de l'air dépasse 63% les sels resteront en solution et ne cristalliseront pas ; si l'humidité relative de l'air est inférieure à 55% tous les sels seront cristallisés. NB : à 35% la nitromagnésite va cristalliser mais il faut garder en tête que 35% est une humidité relative très faible.

Sous le rocher : Les représentations cumulées montrent que les sels les plus abondants sont carnallite, NaCl et KNO₃. La fourchette où les sels peuvent cristalliser est plus large que sur le rocher, avec une humidité relative allant de 40% à 75%. Ainsi, on peut dire que la zone à risque d'altération est plus large dans la cavité qu'en dehors.

L'étude thermodynamique des équilibres de solubilité a permis aux scientifiques de l'IRPA, de nous proposer des graphiques montrant les variations du volume de sel cristallisé en fonction de l'hygrométrie (Fig.21).

On peut alors identifier que les sels les plus abondants sont le chlorure de sodium (NaCl) et le nitrate de potassium (KNO₃). On peut également remarquer que la quantité NaCl sur le rocher est d'environ 10 fois supérieure à celle sous le rocher. La présence de sel abaissant la température de solidification de l'eau, la formation de gel en période de basse température est favorisée sous le rocher. Même si notre étude n'a pas révélé une longue période de grand froid, ce paramètre est certainement à prendre en considération.

De plus, il est possible de déterminer 3 plages d'hygrométrie : une première plage où les sels sont cristallisés (pas de modification de volume des cristaux), une deuxième plage où on peut observer des dissolutions partielles (variation de volume des cristaux) et une troisième plage d'hygrométrie où les sels sont entièrement dissouts.

Selon Julie Desarnaud ce sont les nombreuses variations de volume des cristaux de sel qui sont responsables de l'altération des roches. Ainsi, l'étude basée sur les échantillons prélevés, sur et sous le rocher, montre

que les variations de volume de sel sont davantage possibles sous le rocher, la plage d'hygrométrie permettant les phénomènes de dissolution/cristallisation étant plus large.

Finalement, ce sont les variations journalières d'hygrométrie, que nous pensions sans intérêt, qui semblent être à l'origine de la dégradation du granite par l'action du sel marin. Ces nombreux cycles de dissolution-cristallisation semblent venir à bout de la cohésion entre les minéraux qui constituent la roche.

Julie Desarnaud poursuit encore ses explications avec la notion de « pression de disjonction ». Entre le cristal en croissance et la paroi granitique existe une lame nanométrique de solution sursaturée. La surface du cristal de NaCl apparaît comme négative de part la taille plus importante des ions chlorures par rapport aux ions sodium. La surface du granite en interaction avec la solution aqueuse se polarise négativement. Des forces répulsives apparaissent entre les couches en vis à vis portant des charges de même signe. Au gré des fluctuations d'hygrométrie les variations d'épaisseur de la couche nanométrique sursaturée fragilisent la cohésion entre les minéraux de la roche (Fig.22)¹¹.

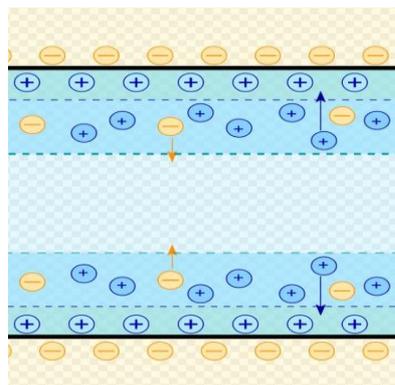


Fig.22 : Schéma de la double couche électrique. Le modèle de Gouy-Chapman-Stern permet de comprendre les interactions coulombiennes répulsives au sein de la lame nanométrique sursaturée. La surface du NaCl ainsi que celle du granite apparaissent chargée négativement. La répartition des charges qui en résulte au sein de la lame sursaturée génère des forces répulsives.

Ainsi, ce n'est pas la « pression de cristallisation » générée par un cristal en croissance qui exerce des forces pressantes sur la roche mais la « pression de disjonction » générée par les variations des forces répulsives au sein de la lame en sursaturation.

VI. Conclusion

La taffonisation est une érosion spectaculaire qui sculpte les paysages de Corse. Notre investissement dans la compréhension de ce phénomène fascinant multi-factoriel nous a amené à aborder différents domaines de la physique et de nouer des relations enrichissantes.

Si l'alternance de gel et de dégel de l'eau peut être un facteur d'altération de la roche, il n'en n'est pas aujourd'hui le principal moteur.

Le piège à sel, la maquette, la simulation informatique et l'analyse des échantillons nous ont prouvé que, même loin de la mer, le vent pouvait déposer des embruns au plafond de la cavité.

La formation de sels génère une surpression sur les minéraux environnants qui désolidarise les minéraux de la roche et conduit à son altération. Cependant, la notion de « pression de cristallisation » pendant longtemps admise est désormais abandonnée pour la notion de « pression de disjonction » proposée par Julie Desarnaud.

Plus que le grand froid, les nombreuses fluctuations d'hygrométrie agissant sur le mécanisme de cristallisation des sels semblent être le principal moteur de la Taffonisation.

Ce mécanisme complexe ne nous ayant pas révélé tous ses secrets d'autres pistes d'étude peuvent être envisagées autour des mécanismes de dilatation différentielle des minéraux ou de réactions chimiques entre les minéraux.

Nos recherches et nos expériences ne doivent pas non plus nous faire oublier que l'érosion du granite est un phénomène très lent, « *I stantari* », les menhirs sculptés à l'âge du bronze en sont le témoignage. La compréhension de ces phénomènes d'érosion est essentielle dans la conservation du patrimoine corse.

¹¹ https://fr.wikipedia.org/wiki/Double_couche_électrique - Wikipédia

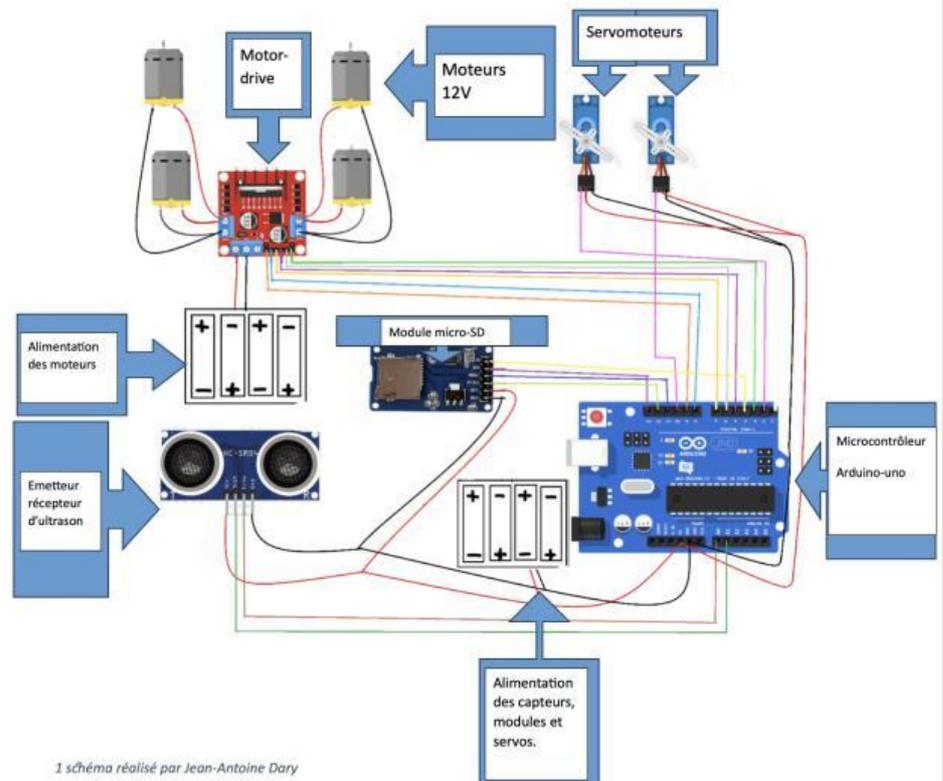
VII. Annexes

Annexe 1 : Une image de la cavité scannée par un Rover ultrason

Jean Antoine nous explique sa méthode : j'ai construit un Rover qui permet de scanner la cavité de notre rocher. Il dispose d'une tourelle ultrason pour une image 3D sous la forme d'un nuage de points. Pour cela, j'ai utilisé différents composants comme des moteurs, un Motor drive, deux servomoteurs et un émetteur récepteur ultrason HC-SR04, un module pour carte micro-SD, le tout dirigé par un micro-contrôleur Arduino-Uno, alimenté en 12V et en 5V. Les servomoteurs dirigent la tourelle au bout de laquelle est installé le capteur ultrason. Le capteur va générer une impulsion puis attendre la réception de ce signal, nous connaissons la vitesse du son, 340 m.s^{-1} , nous pouvons donc en déduire la distance aller-retour parcourue par l'impulsion. Les données d'angle de chaque servomoteur et la distance sont enregistrées sous la forme de coordonnées sphériques dans la carte SD. Après le scan, les données du nuage de points enregistré, sont traitées par un programme python qui les convertit en coordonnées cartésiennes afin d'en faire une représentation 3D.

Le plan :

Le Rover est constitué de différents composants :



Programmation du Rover :

```
// by Jean Antoine Dary
#include "Servo.h" // librairie pour controler les servos moteurs
#include <SD.h>    // librairie pour utiliser le module carte micro SD

int enA = 9; // initialisation des moteurs
int in1 = 8;
int in2 = 7;
int enB = 3;
int in3 = 5;
int in4 = 6;
```

J'ai codé le Rover grâce à l'IDE d'Arduino, le programme est en C++. Le programme permet au Rover de se déplacer, de gérer la tourelle, le capteur à ultrasons et d'enregistrer les données dans la carte SD, si le

Rover est branché à l'ordinateur il envoie aussi les données à celui-ci, le code est commenté pour faciliter sa compréhension¹².

Interprétation des données

L'interprétation des données se fait grâce à un programme python.

Quels types de données ?

La distance, l'angle du Servo1 (angle azimutal), l'angle du Servo2 (angle d'élévation).

Ce sont donc des coordonnées sphériques (r, θ, ϕ) .

Elles sont enregistrées par le Rover dans un fichier « data.txt ».

Afin de les traiter, le programme python les convertit en coordonnées cartésiennes (x, y, z) .

La conversion :

Les angles en degrés sont convertis en radians pour faciliter python puis ces relations sont appliquées

$$x = r \sin(\varphi) \cos(\theta)$$

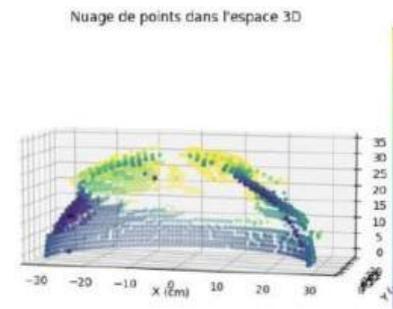
$$y = r \sin(\varphi) \sin(\theta)$$

$$z = r \cos \varphi$$

Enfin, le programme trace le graphique du nuage de points.

Si on reconnaît la forme générale de notre cavité, la mesure des distances montre parfois de grandes incertitudes.

La précision de la mesure dépend de la distance entre l'émetteur et l'obstacle et de l'angle d'incidence de l'onde.



Annexe 2 : Comment mesurer la pression générée par l'eau qui prend en glace ? Quatre démarches qui ne nous ont pas donné satisfaction.

1) Notre première idée : Utiliser un manomètre électronique.

Un tube à essais contenant 20g d'eau, est placé au sein d'un mélange réfrigérant constitué de glace pilée et de sel de cuisine (chlorure de sodium). Un thermomètre est placé en périphérie du mélange réfrigérant afin d'avoir une idée de l'évolution de sa température. Un tuyau relie le bouchon percé, qui bouche le tube à essais, au manomètre.

Deux qualités de glace semblent s'être formées dans le tube à essais, l'une opaque dans le fond, la seconde relativement transparente.

La pression de l'air repoussé par l'eau qui prend en glace peut certainement être identifiée comme la pression de la glace repoussant un bouchon, un piston.

Comment calculer la force pressante sur un bouchon virtuel en se basant sur la brusque variation de pression ?

La section interne du tube à essais a pour diamètre 14mm. $S = 1.54 \times 10^{-4} \text{m}^2$

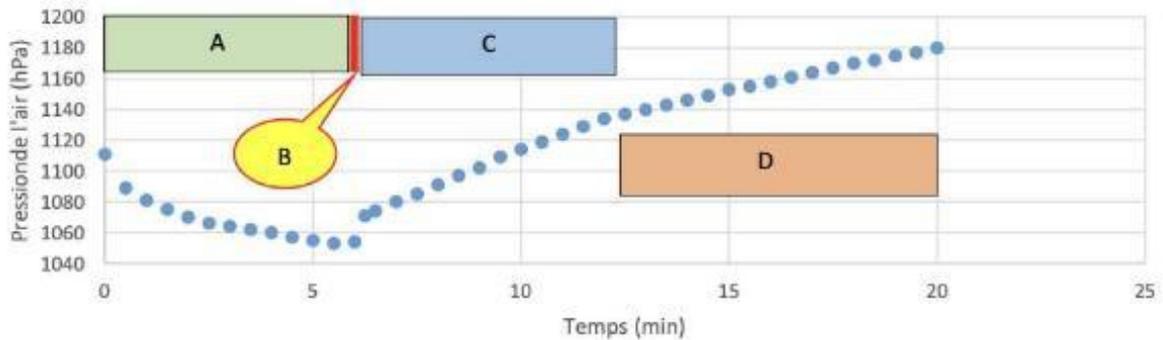
$$F = P \times S \quad F = 1500 \times 1,54 \times 10^{-4} \quad F = 0,23 \text{ N soit } 0,15 \text{ N pour } 1 \text{cm}^2$$

Soit la pression exercée par une masse de 15g répartie sur une surface de 1cm^2

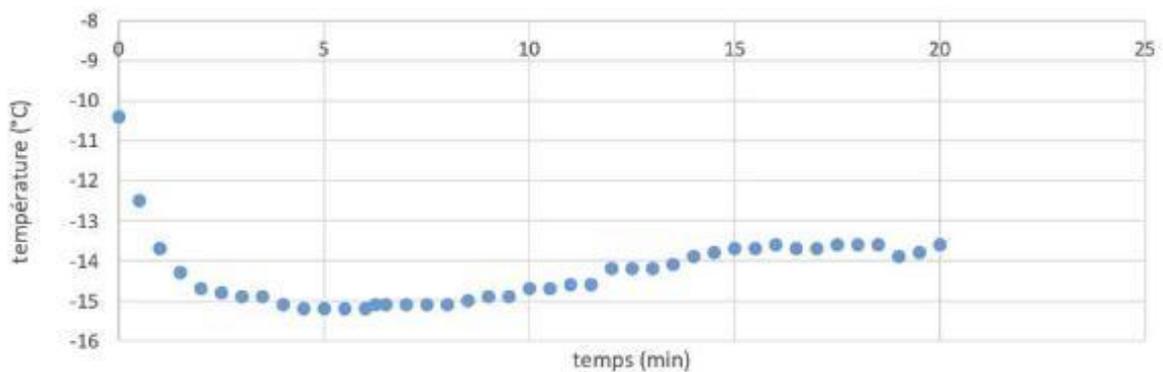
Le caractère compressible de l'air et l'influence de la température faussent peut-être notre mesure ?

¹² Extrait du programme réalisé. Programme complet : https://drive.google.com/file/d/1eqllhwS7qh6_Hj6hVOzfNxTFXN7-VNpy/view?usp=drive_link

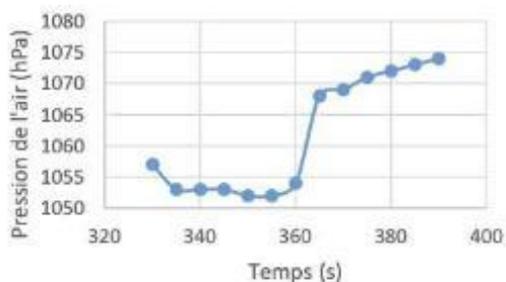
Pression de l'air au-dessus de l'eau qui prend en glace (hPa)



Température en périphérie du mélange réfrigérant



Focus sur la brusque variation de la pression de l'air en fonction du temps



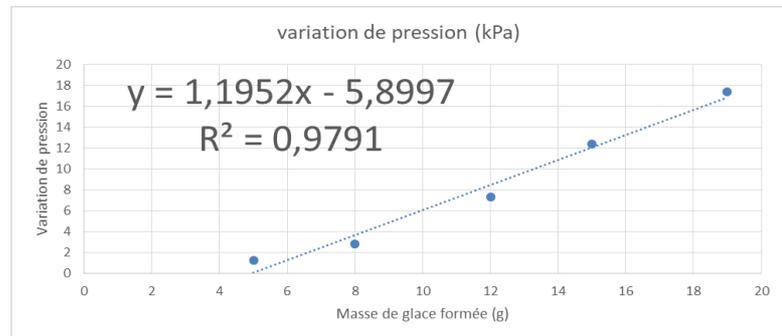
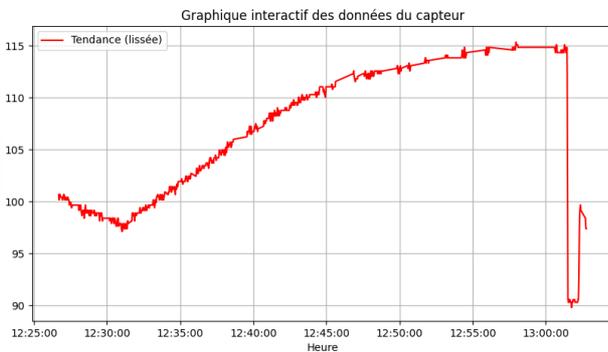
Durant les 5 premières minutes, la température en périphérie du mélange réfrigérant décroît. La pression de l'air décroît aussi car l'air se refroidit. Entre 5 minutes et 10 minutes, la température est relativement stabilisée, mais à 6 minutes une brusque hausse de la pression de l'air est observée. La pression de l'air ne cesse de croître, la courbe laisse apparaître trois phases : la brusque augmentation de pression à 6 minutes sur une plage de 5 secondes, une augmentation plus lente de 6 minutes et 5 secondes à 12 minutes (formation lente de glace ?), une croissance encore plus lente de la pression (réchauffement de l'air ?).



Un regard critique sur ce montage : la formation de glace dans le tube à essais, au cœur du mélange réfrigérant, est très peu visible. Cela nous met en difficulté pour interpréter la croissance de la pression de l'air lors des phases C et D observées sur le graphique... Une partie de l'eau prendrait en glace plus lentement lors des phases C et D ? Nous pourrions placer le tube à essais en périphérie du mélange réfrigérant pour une observation plus facile...

2) Notre deuxième idée : utiliser un capteur de pression relié à un micro-contrôleur Arduino.

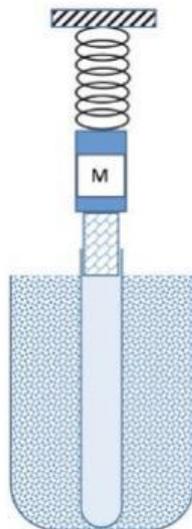
Dans ce protocole nous faisons varier la quantité d'eau dans le tube à essais. Notre hypothèse : la variation de pression observée lors de la prise en glace devrait augmenter avec la masse d'eau en jeu. Ci-dessous, la variation de pression observée lors de la solidification de 19g d'eau.



L'hypothèse est bien vérifiée, la variation de pression de l'air augmente bien avec la masse d'eau qui prend en glace. Mais nous réalisons que cette variation de pression dépend aussi du volume d'air présent au-dessus de l'eau qui prend en glace. Ce protocole est donc discutable.

3) Notre troisième idée : utiliser un dynamomètre

Une masse M étire le ressort d'un dynamomètre. Le tube à essais plongé dans le mélange réfrigérant est placé sous la masse suspendue, de façon à soutenir un peu la masse. L'indication du dynamomètre relevée.

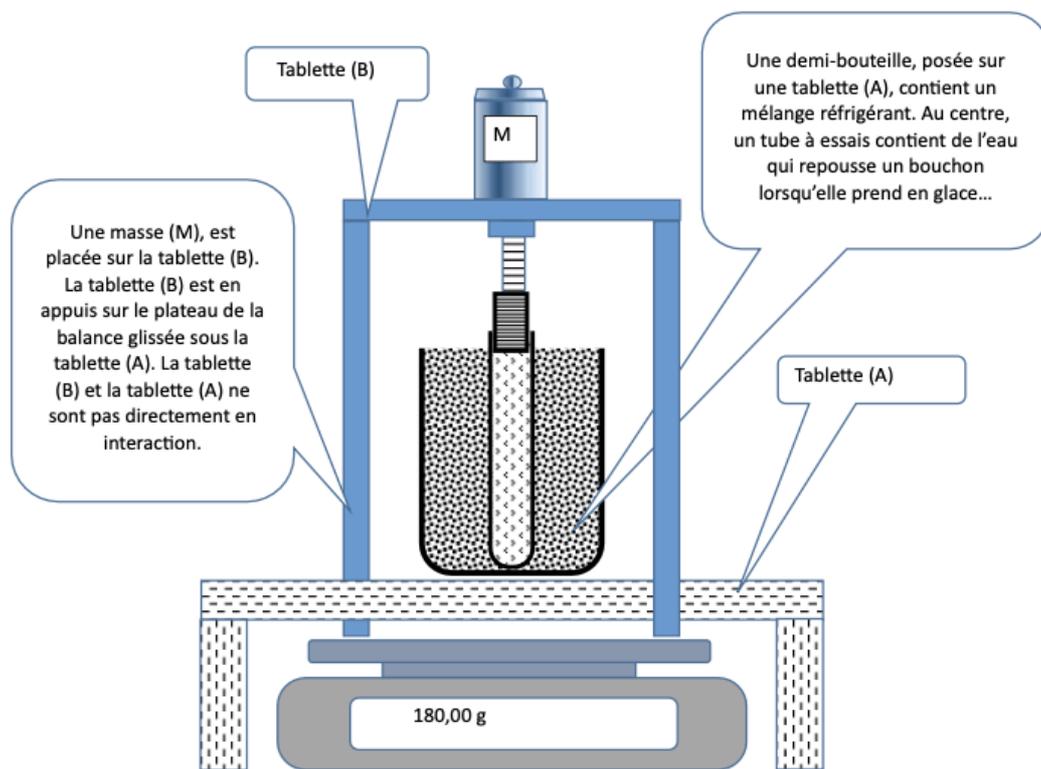


Lors de la poussée de l'eau qui prend en glace, la force affichée par le dynamomètre tend à diminuer. Nous pourrions déterminer la force exercée par la glace sur le bouchon... Le déplacement du bouchon est minime, nous ne disposons pas d'un dynamomètre suffisamment sensible...

Nous optons pour un autre montage, avec une balance électronique précise à 0,01g, en gardant le même principe...



masse
façon à
la
est alors



Là encore nous rencontrons des difficultés. La prise en glace se produit dans la partie inférieure du tube à essais, le niveau d'eau monte, nous observons des fuites au niveau du bouchon.
 Pourrions-nous moins remplir le tube à essais ?

Nous réalisons que nous faisons fausse route avec les protocoles précédents, il nous faut mesurer la variation de pression de l'eau qui prend en glace dans un volume fini.

4) Notre quatrième idée : utiliser un capteur de pression résistif :



...stique vari
 ...pteur sur le
 ...sion d'air c
 ...eux faces d



...ous pouvons le vérifier
 ...me du crayon. Mais
 ...tance. Les forces
 ...é.

Annexe 3 : Un programme pour traiter les données de température et d'hygrométrie

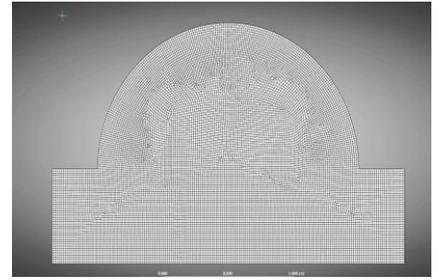
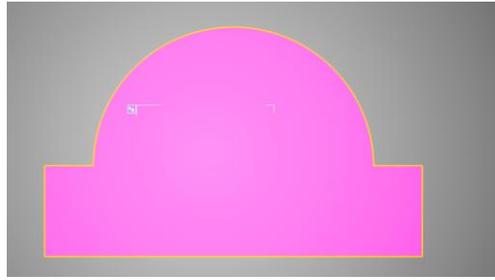
Nous avons utilisé deux « data logger » de Lascar electronics, EL-USB-2, enregistreurs de température et d'hygrométrie

[EL-USB-2 | USB Temperature And Humidity Data Logger | Lascar](#)



Tout d'abord, nous avons modélisé le rocher de notre étude en entrant ses dimensions.

Grace au module discovery présent dans ANSYS, notre rocher prend la forme suivante (image de gauche).



La création d'un maillage

Après avoir créé une forme géométrique, il faut rendre cette forme compréhensible par le logiciel.

La forme ci-dessus, ne lui permet pas encore d'étudier la mécanique de l'air.

Il convient alors de créer un maillage (ci-dessus, image de droite).

Ce maillage représente un quadrillage d'environ 0,015m par carré.

Les croisements des lignes permettent de modéliser l'évolution de l'air entrant dans cette forme géométrique.

En effet l'évolution de la position de chaque particule est calculée à chaque croisement en utilisant l'équation de Navier Stokes

La mise en place des paramètres de calcul

Une fois le maillage réalisé, plusieurs paramètres sont nécessaires pour permettre une modélisation simple mais se rapprochant au plus près de la réalité.

L'utilisation de l'équation Navier-Stokes par la mise en place de diverses caractéristiques

1 - Compression de l'air au niveau du col de la Vaccia.

L'air est considéré comme compressible à partir de 100m/s à 0 degré et à pression atmosphérique.¹⁴

Grâce aux données de météo France nous avons constaté que l'air ne dépassait pas les 15m/s en moyenne au niveau du col de la Vaccia.

Nous considérons l'air incompressible lors de la simulation en mettant une vitesse d'entrée de 11 m/s en moyenne.

2 - Entrée de l'air

Nous avons défini l'air en entrée comme un fluide en écoulement turbulent. En effet d'après la formule de Reynolds¹⁵ $R_e = \frac{\rho v L}{\mu}$ soit :

- R_e nombre de Reynolds (s.u)

- ρ masse volumique de l'air : $1,293 \text{ kg/m}^3$ à 0°C

- v vitesse du débit de l'air (dans notre cas 11m/s)

- L dimension transversale en entrée (défini comme 0,5m sur la simulation)

- μ viscosité dynamique du fluide (dans le cas de l'air $\mu = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}$ à 20°C)¹⁶

¹⁴ Cours de mécanique des fluides, écoulement compressible (Page 5) proposé par le LMFTEUS (département en mécanique d'ingénierie de l'université de Sherbrook)

¹⁵ Physique 1^{re}S option sciences expérimentales, spécial professeur, collection Durandau, Hachette Education, 1994 (page 80)

¹⁶ https://fr.wikipedia.org/wiki/Viscosité_dynamique - Wikipedia

Ainsi après l'application de la formule, on trouve un nombre de Reynolds égal à environ 390741. On sait que si le nombre de Reynolds est supérieur à 2000 alors le mouvement d'air est considéré comme turbulent¹⁷.

Finalement, nous avons laissé le logiciel créer les turbulences dans la forme géométrique.

3 - Pression intérieure sous le rocher

Nous avons défini une pression intérieure de 0,9 hPa pour se rapprocher au mieux des conditions expérimentales sous le rocher.

4 - Répétition des calculs par le logiciel

Pour pouvoir ensuite avoir un résultat qui montre l'évolution des courants, nous indiquons que toutes les secondes le simulateur calculera la position et la vitesse des particules d'air.

5 - Vecteur « vitesse »

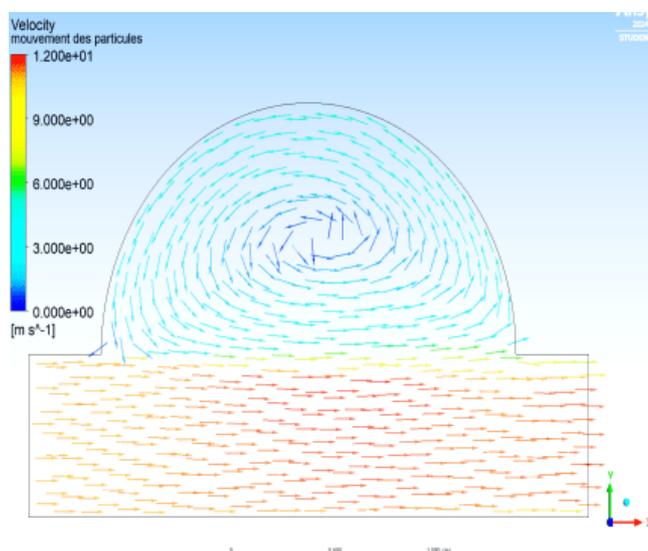
Finalement pour pouvoir observer ces résultats nous définirons un vecteur vitesse qui sera enregistré tout le long de la simulation et qui permettra de voir l'évolution sous le rocher.

Vitesse d'entrée	Entrée de l'air	Pression intérieure	Répétition des calculs	Modélisation d'un Vecteur vitesse
11m/s	Réalisé par le logiciel	Pi<0,9hPa	1 seconde	Permet de rendre compte de la direction de l'air

Les résultats

La modélisation nous a alors permis d'obtenir les résultats suivants¹⁸ :

Image représentant le sens des courant d'air



Ainsi on peut imaginer que les embruns sont susceptibles d'être déposés, par le vent, au plafond de la cavité bien qu'elle soit relativement fermée.

¹⁷ Physique 1^{re}S option sciences expérimentales, spécial professeur, collection Durandea, Hachette Education, 1994 (page 80)

¹⁸ Résultats obtenus : <https://youtu.be/Unjfi-4zUUC>

VIII. Bibliographie

<https://www.corsematin.com/article/sartene/taffoni-et-orii-la-pierre-et-ses-mysteres-a-roccapina>

<https://www.futura-sciences.com/sciences/questions-reponses/molecule-glace-prend-elle-plus-place-eau-liquide-7327/>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Granite#>

<http://doc.lerm.fr/entretien-avec-julie-desarnaud-sur-la-cristallisation-des-sels/>

[Mécanisme de croissance et dissolution de cristaux de KCl sous charge : Apport dans la connaissance des mécanismes d'altération des pierres par les sels - TEL - Thèses en ligne \(hal.science\)](#)

https://fr.wikipedia.org/wiki/Double_couche_électrique

IX. Remerciements

Mr. BANDINI Gérard, Animateur EPN / Fabmanager, Association OPRA, Bastia.

Dr. DESARNAUD Julie, Materials Scientist, Institut Royal du Patrimoine Artistique, Jubelpark 1, 1000 Brussel, Belgium.

Mme. MAROSELLI Véronique, Présidente UDDPC région Corse, pour le prêt de matériel.

Mr. NIKOLAEV Mikhail, Ingénieur, (Ancien élève du Club Sciences du Collège-Lycée Jeanne d'Arc Bastia), Paris.

PAOLI Eloïse: À l'automne 2023, non loin du rocher objet de notre étude, Eloïse PAOLI, élève en classe de seconde, a escaladé la roche alvéolée pour y cacher un capteur de température et d'hygrométrie. Expatriée cette année au Québec, elle n'a pu poursuivre l'aventure des Olympiades de Physique France avec nous. Nous la remercions pour l'autorisation de publication de la photographie figurant en page de garde.

Mr. QUILICHINI Yann, Ingénieur de recherche, UMR CNRS Sciences Pour l'Environnement (SPE), Université de Corse, Laboratoire, Corte.

Mr. SALGE Simon et son équipe, Glacier à Saint Florent, pour notre expérience dans leur chambre froide.

Mr. METAIS Mehdi, Mr. PELERIN Karl, Mr. GALLET Mickaël, Mr. MONNARD Matthieu, le technicien de laboratoire et les agents techniques du Lycée Jeanne d'Arc.