



La Grotte des Cristaux Géants, Naica, Mexico: un aperçu general

Giovanni Badino

LA MINE DE NAICA



La Mine de Naica

- Chihuahua, Nord du Mexique
- Naica: mine d'argent, de plomb et de zinc, actif industriellement depuis la fin du XIX^{ème} siècle.



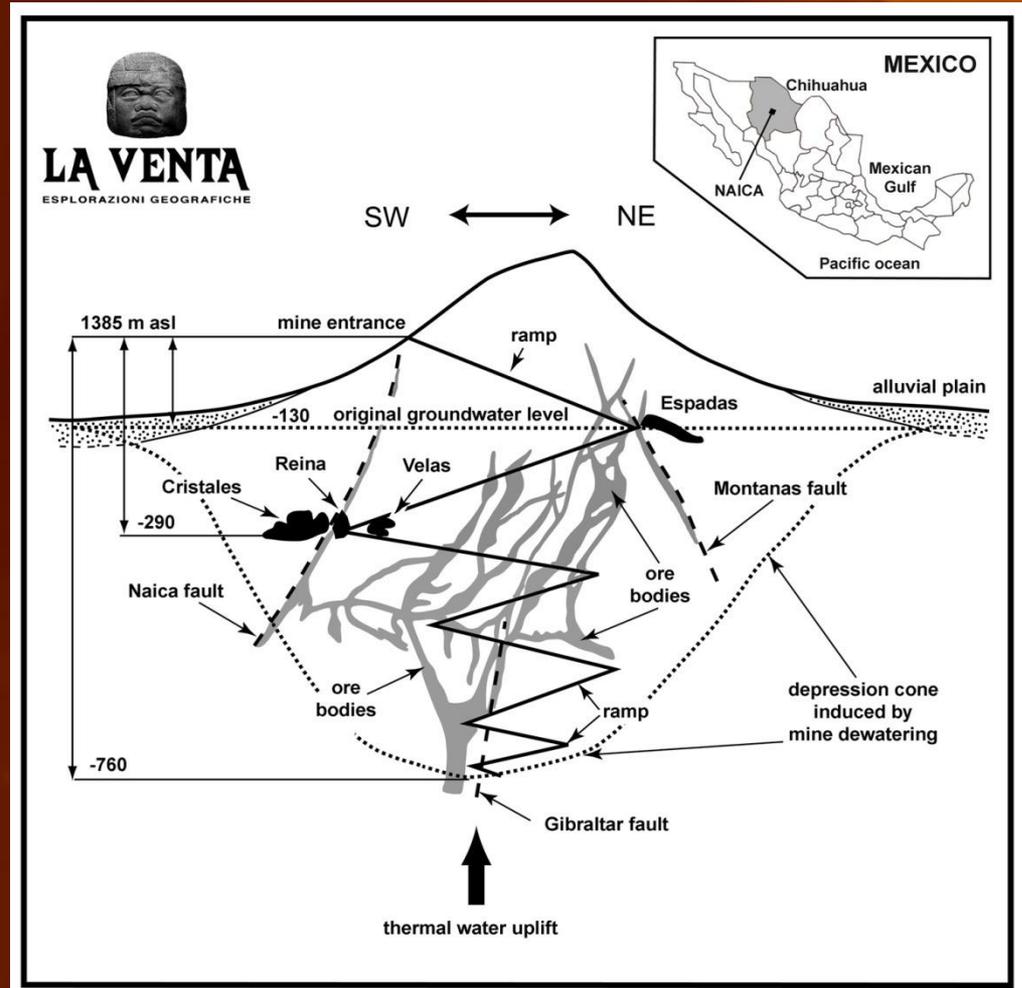
La Mine de Naica

- **Entrée principale: 1385 m d'altitude, sur la Sierra de Naica, à 150 m au-dessus du plan environnant.**
- **Concession: Compagnia Peñoles, Mexique**



La Mine de Naica

- Dans les profondeurs de la Sierra de Naica il y a eu une infiltration des magmas ("batolite") qui provoque la montée des eaux chaudes et fortement minéralisées.
- La température de la roche profonde est d'environ 55 ° C.



La Mine de Naica

- **Le niveau de la nappe phréatique est abaissé par une série de pompes.**
- **Actuellement l'eau est d'environ 800 m en dessous du niveau naturel.**
- **Pompage: 1500 kg/s à partir de -800 m.**
- **L'énergie requise: environ 10^8 kWh par an.**



La Mine de Naica

- Niveau 590, temperature de l'eau 49.6 °C...

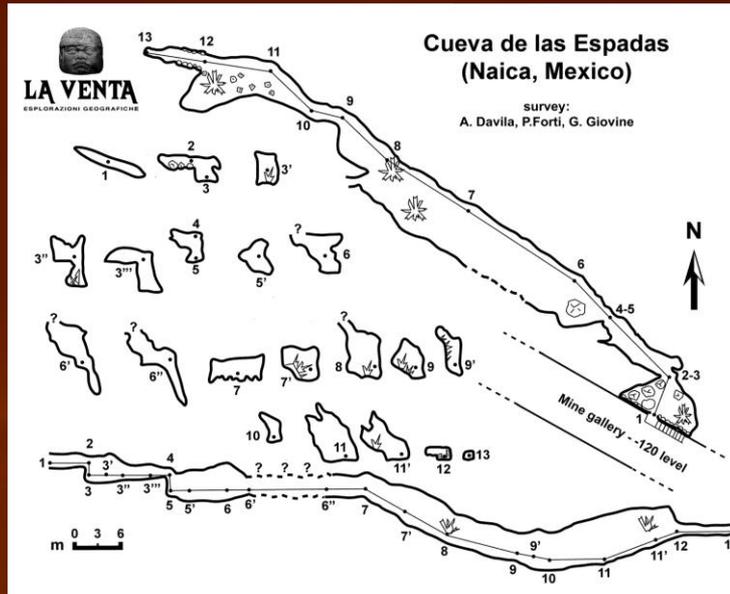


LES GROTTES DE NAICA



Cueva de las Espadas

- La première grotte de Naica a été trouvée en 1910 et sa description publiée en France deux ans plus tard.
- Elle s'étend sur une fracture longue de 80 m au Niveau 120.



Cueva de las Espadas

- **Le cristaux de gypse étaient énormes, jusqu'à 2 mètres de longueur, mais la plus part ont été extraits et vendus.**



LES GROTTES A CRISTAUX DE GYPSE DE NAICA (MEXIQUE)

En dehors de filons métallifères de nature variée, le Nord du Mexique contient, en plusieurs régions, des gisements miniers en forme d'amas ou de poches, du type dit *remplissage de grottes*, dans lesquels des minerais de remaniement sont venus incruster des grottes, ou plutôt des alvéoles et souffres analogues à ceux que l'on trouve vides en tant de pays calcaires.

Dans le Nord du Mexique, ces sortes de gisements contiennent, jusqu'à une profondeur encore inconnue, des carbonates de chaux et de plomb argenti-

qui restent dans les alvéoles de cette gigantesque roche dépassent probablement de beaucoup celles qu'on en a déjà extraites.

Dans l'une des mines, on a reconnu un massif qui a 180 mètres de hauteur sur une section d'environ 90 mètres de diamètre; il contient 5 400 000 tonnes de minéral valant à peu près 675 millions de francs. Dans un autre massif, exploité actuellement entre 500 et 500 mètres de profondeur, un sondage fait à partir de 500 mètres et poursuivi jusqu'à 900 mètres, est toujours resté dans le même minéral.



Fig. 1. — Grands cristaux de gypse de Naica.

fers avec oxydes de fer et quelques sulfures; leur facilité extrême d'exploitation et de fusion, la richesse de certaines parties et les énormes quantités de minerais contenues dans quelques-unes de ces cavités ont fait la célébrité des mines de Santa-Eulalia, près de Chihuahua.

Pour donner, en passant, une idée de ces mines, disons qu'exploitées par les Espagnols et les Mexicains pendant deux siècles, à partir de leur découverte en 1704 — et cela au moyen de procédés très rudimentaires — les mines de Santa-Eulalia ont fourni pour plus de deux milliards d'argent et de plomb. Les Compagnies américaines qui leur ont succédé sur la plupart des concessions font, en général, d'énormes bénéfices, et les quantités de minéral

Les mines de Naica, analogues à celles de Santa-Eulalia, et situées à 120 kilomètres au Sud, ont été découvertes il y a peu d'années, et leur exploitation, commencée en 1901, a déjà produit pour 21 millions de minéral.

Or, parmi des massifs de formes très variées, mais généralement analogues à des colonies plus ou moins toises et irrégulières, massifs déjà reconnus sur 200 mètres de profondeur, on rencontre encore quelques cavités plus petites qui n'ont pas été remplies par des minerais: les unes sont simplement tapissées par un dépôt mamelonné et hilare comme neige de carbonate de chaux cristallin, du type des stalactites, et les autres, dont nous voulons parler ici plus particulièrement, par des cris-

taux de gypse ou sulfate de chaux, qui leur donnent un aspect très original.

Ces dernières, découvertes en 1910, sont au nombre de trois, communiquant entre elles par des ouvertures juste suffisantes pour le passage d'un



Fig. 2. — Cristaux de gypse de Naica.

homme. Toutes trois sont à peu près égales, ayant en moyenne 10 à 15 mètres de long, 4 à 6 de large et autant de haut. La Compagnie minière de Naica a eu soin de former leur entrée par une porte, pour éviter leur détérioration, et d'y aménager des ponts et des escaliers en bois, ainsi que de petits jets d'air comprimé, pour en faciliter la visite. Bien que ces grottes soient à moins de 200 mètres sous le sommet de la colline et au niveau de la plaine qui l'entoure, il y règne une température excessivement élevée, probablement due à l'oxydation continue des minerais sulfurés, qui, par double réaction sur les calcaires, ont produit ces gypses.

Les photographies ci-jointes donnent une faible idée de l'aspect vraiment extraordinaire que présentent ces diverses grottes. On y pénètre en venant d'une galerie principale de la mine, et l'on a d'abord devant soi des vides à dépôts ordinaires de carbonate mamelonné. Au fond de cette première grotte, on descend par un escalier à travers des cristaux de gypse énormes, atteignant presque la dimension d'un homme et dont la figure 1 donne une idée; quelques-uns ont 1 m. 50 de hauteur et une section de 0 m. 50 sur 0 m. 20. On arrive ainsi dans la seconde grotte (fig. 2), puis dans une troisième (fig. 5), qui ferme la série.

Sur des distances assez restreintes, ces trois grottes offrent des aspects très variés; les cristaux eux-mêmes changent de forme: tantôt la paroi semble hérissée de poignards menaçants, tantôt c'est une forêt de prismes incolores, dont toutes

les faces supérieures sont couvertes d'un dépôt blanc cristallin, comme si, en dépit de la chaleur qui règne dans ces antres, une chute de neige y était restée solidifiée à jamais. Certains de ces cristaux, même parmi les plus gros, sont légèrement teintés de noir, soit seulement vers leur extrémité libre, soit sur une bande longitudinale. Beaucoup contiennent des vides parallèles à leur longueur et encore en partie remplis d'un liquide incolore, reste de la solution saline qui leur a donné naissance. Enfin, tous ces cristaux sont implantés sur une croûte dure et sonore qui recouvre la roche, et, au moindre choc, ils rendent un son clair très agréable; leur simple frottement, en passant, produit une sorte de musique, et il suffit de promener sur eux une baguette, comme font les enfants le long d'une grille en fer, pour imiter un véritable carillon, dont les sons se trouvent renforcés par la forme même des cavités.

On avait déjà trouvé précédemment, en quelques



Fig. 3. — Cristaux de gypse de Naica.

autres points du monde, des grottes à beaux cristaux de gypse associés aux produits d'altérations de sulfures métalliques: par exemple au Laurion grec et à Gams (Styrie). Mais nulle part, à notre connaissance, le phénomène n'a pris une ampleur comparable à celle des grottes de Naica.

N. DÉGOCY,

Les Grottes du Niveau 290

- **Autour du 1990: le pompage la nappe phréatique abaisse son niveau en dessous du Niveau 290.**
- **Les grottes encore inconnues de ce niveau sortent de l'eau, dans l'obscurité.**



Les Grottes du Niveau 290

- **Avril 2000: Pendant le forage d'un tunnel de ventilation au Niveau 290 des roches très riche en cristaux de gypse sont traversées.**
- **Peu de temps après une première grotte est découverte**
- **"Ojo de la Reina", une géode d'environ 10 m de diamètre.**



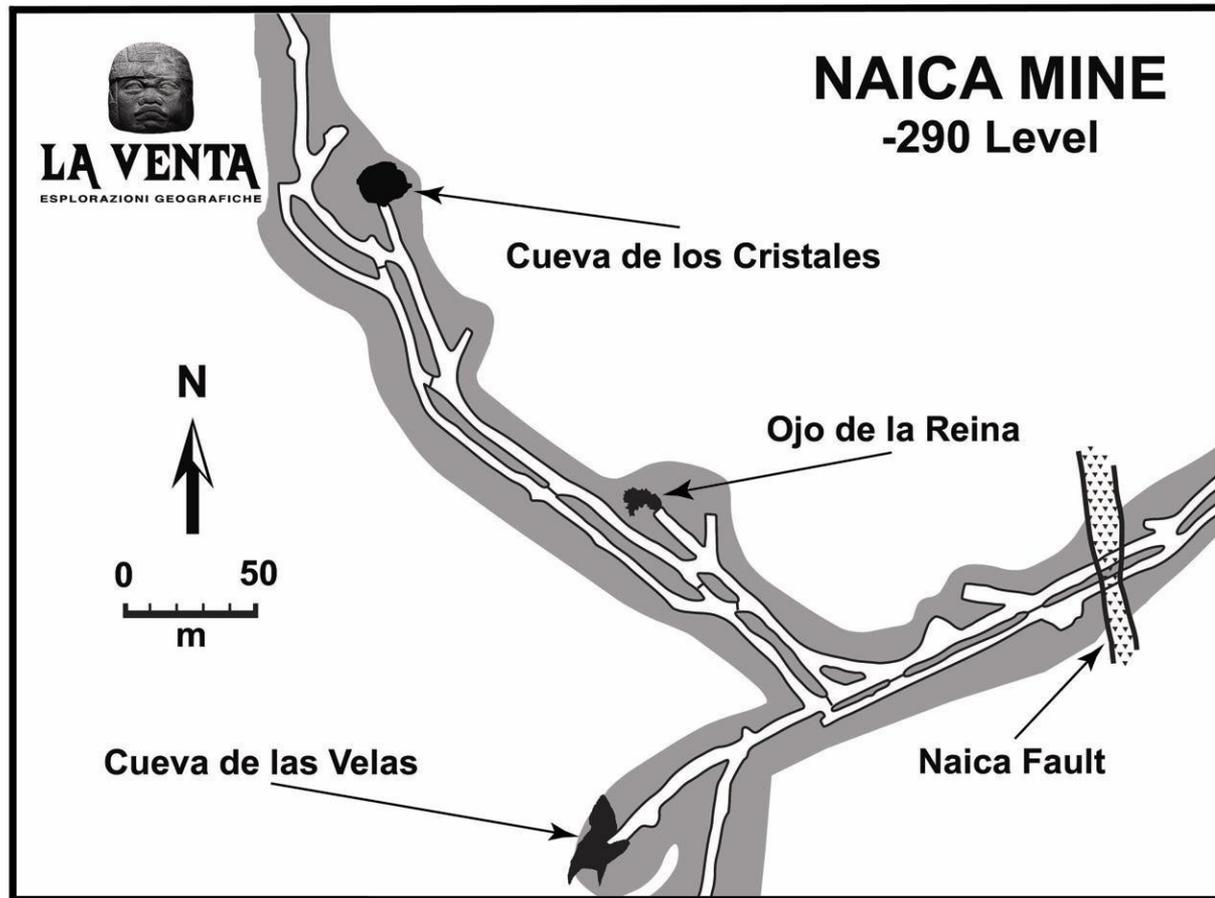
Les Grottes du Niveau 2

- Le forage se poursuit et après 150 m une grotte beaucoup plus grande est découverte.
- Elle est pleine d'énormes cristaux.
- Ce sont des cristaux de gypse, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, de "Sélénite".
- Ils ont été déposés -170 m sous l'eau, à 55 °C.
- Une merveille de la Terre.



Les Grottes du Niveau 290

- Plan du Niveau 290



“Cristales”



- **Or, jamais minéralogistes ne s'étaient rencontrés dans des circonstances aussi merveilleuses pour étudier la nature sur place. Ce que la sonde, machine inintelligent et brutale, ne pouvait rapporter à la surface du globe de sa texture interne, nous allions l'étudier de nos yeux, le toucher de nos mains.**
- **Je m'imaginai voyager à travers un diamant creux, dans lequel les rayons se brisaient en mille éblouissements.**
 - J. Verne, Voyage au Centre de la Terre, Hetzel, 1863



“Cristales”

- L’hostilité de l’atmosphère est extrême: la température est estimée à 60 ° C, avec une humidité très élevée.
- Il est impossible d’y rester plus de 2 ou 3 minutes.
- La grotte est nommée «Cueva de los Cristales Gigantes”.



Cristales

- Le tunnel d'accès est fermée par une paroi et une porte en acier.



Cristales

- Sur l'entrée, une structure fermée transparente est construite pour réduire les perturbations à l'intérieur de la grotte.



Cristales

- **Trois spéléologues (Carlos Lazcano, Mexique, et Claude e Niki Chabert, France) visitent rapidement la première chambre 30x40 m².**
- **Les conditions du milieu interdisent de faire des relevés topographiques et des explorations.**
- **La grotte Cristales devient un mythe: inaccessibles et inexplorées, mais aussi la grotte la plus extraordinaire jamais trouvée.**



Proyecto Naica

- **Le 16 Janvier 2006, à Naica, a été signé un accord général pour un programme d'études sur les grottes Naica entre :**
 - Compañia Peñoles (propriété)
 - SpeleoResearch & Film (coordination générale)
 - C/Producciones (documentation)
 - Association La Venta (recherches et explorations)



Proyecto Naica

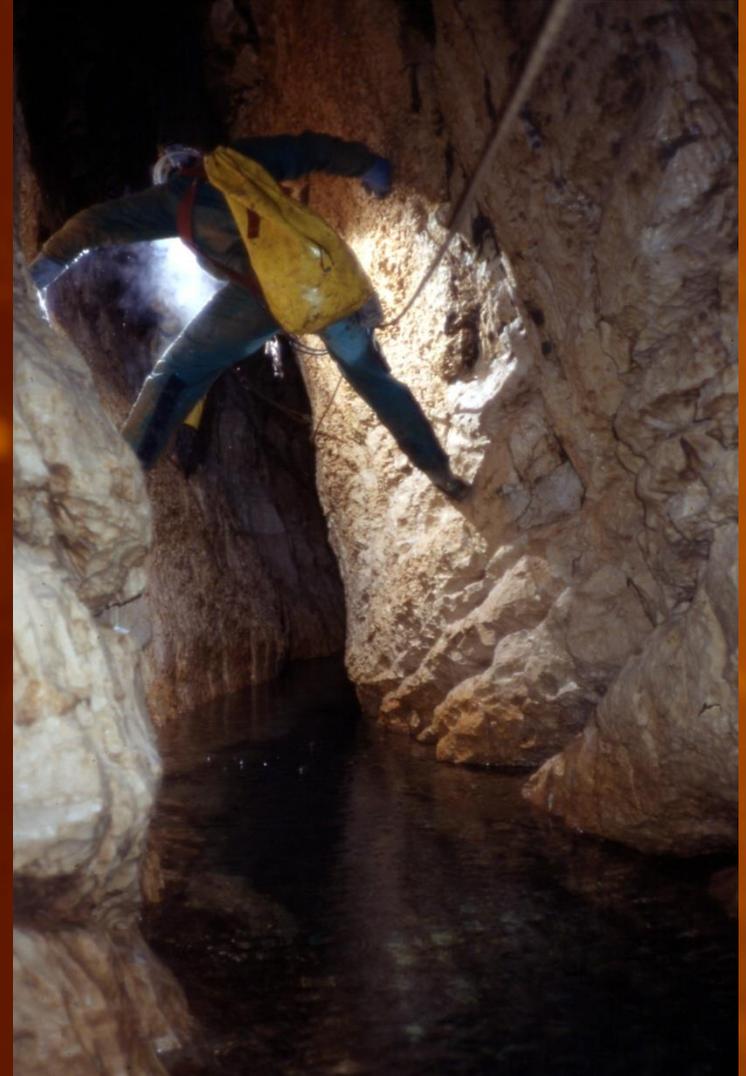
- **ITALY**
- **Bari, Dip. Geomineralogico, Dip. di Medicina Interna e Immunologia**
- **Bologna, Dip. Scienze della Terra**
- **Firenze, Dip. Scienze della Terra**
- **Modena e Reggio Emilia, Dip. Scienze della Terra, Dip. di Paleobiologia e dell'Orto Botanico**
- **Torino, Dip. Fisica**
- **Politecnico di Milano, Polo Reg. Lecco, Laboratorio Sensibilab**
- **MEXICO**
- **Universidad Nacional Autonoma de Messico, Città del Messico, Instituto de Geologia**
- **NORWAY**
- **Università di Bergen, Norvegia, Dept. of Earth Science**
- **SPAIN**
- **Almeria, Spagna, Dep. de Hidrogeologia y Quimica Analitica**
- **Estacion Experimental del Zaidin - CSIC, Granada, Spagna**
- **SWITZERLAND**
- **ETH Zurich, Svizzera**
- **USA**
- **New Mexico Tech, Socorro, USA**
- **New Mexico University, Albuquerque, USA, Dept. of Biology**

LE MILIEU DE "CRISTALES"



Le Milieu de “Cristales”

- Les grottes dans les roches calcaires sont généralement traversées par des flux d'air et d'eau provenant de la surface.
- Leur température est alors la température extérieure moyenne annuelle, en général assez basse: à Paris 12 °C, mais 3 °C à 2000 m d'altitude dans les Alpes ...



Le Milieu de “Cristales”

- La grotte “Cristales” est chaude car elle a contenu des eaux géothermiques.
- Elle est en contact thermique non avec l'atmosphère, mais avec les profondeurs de la Terre ...



Le Milieu de “Cristales”

- La température de la Cueva de los Cristales (45-47 °C) ne semble pas si élevé en comparaison avec les extrêmes externes.



Le Milieu de “Cristales”

- **Plus hautes temperatures historiques à l'air libre :**
 - 58 °C à El Aziz, Libye (1922)
 - 57 °C Death Valley, Californie (1913)



Le Milieu de “Cristales”

- Mais à l'extérieur, l'air est très sec et la peau peut s'évaporer.
- L'évaporation a besoin de beaucoup d'énergie et refroidit la peau.
- Si nous avons de l'eau à boire, il est possible de survivre.



Le Milieu de “Cristales”

- Si l'air est très humide l'évaporation est impossible.
- La peau atteint la température de l'environnement.
- De 27-28 °C, la sensation de chaud est insupportable.
- Au-dessus de 33 °C le milieu est mortel.
- Au-dessus du 42-43 °C la sensation n'est plus de chaud, mais d'être ébouillanté, parce que les cellules de la peau meurent.



Le Milieu de “Cristales”

- **Humidex est une mesure de la «température ressentie», qui dépend de la température et de l'humidité de l'air.**
- **“Humidex degrés”:**
 - 35-39: mal à l'aise;
 - 40-45: fort et général inconfort, danger;
 - 46-53: très dangereux;
 - > 54: choc thermique imminent, mort.

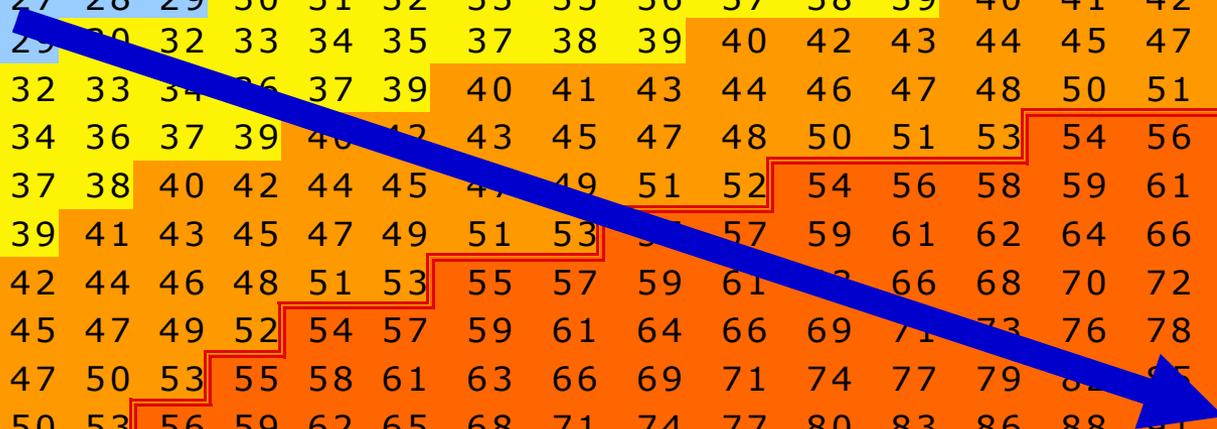


Le Milieu de "Cristales"

HUMIDEX INDEX

relative humidity [%]

	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
21	17	18	18	19	20	20	21	22	22	23	24	24	25	26	26	27	28	29	29
23	19	20	21	21	22	23	24	24	25	26	27	28	28	29	30	31	31	32	33
25	21	22	23	24	25	26	26	27	28	29	30	31	32	33	33	34	35	36	37
27	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
29	26	27	28	29	30	31	32	33	35	36	37	38	39	40	41	42	43	45	46
31	28	29	30	32	33	34	35	37	38	39	40	42	43	44	45	47	48	49	50
33	30	32	33	34	36	37	39	40	41	43	44	46	47	48	50	51	53	54	55
35	33	34	36	37	39	40	42	43	45	47	48	50	51	53	54	56	57	59	61
37	35	37	38	40	42	44	45	47	49	51	52	54	56	58	59	61	63	64	66
39	37	39	41	43	45	47	49	51	53	55	57	59	61	62	64	66	68	70	72
41	40	42	44	46	48	51	53	55	57	59	61	63	66	68	70	72	74	76	79
43	42	45	47	49	52	54	57	59	61	64	66	69	71	73	76	78	81	83	85
45	45	47	50	53	55	58	61	63	66	69	71	74	77	79	81	85	87	90	93
47	47	50	53	56	59	62	65	68	71	74	77	80	83	86	88	91	94	97	100
49	50	53	56	60	63	66	69	73	76	79	82	86	89	92	95	99	102	105	108
51	53	56	60	63	67	71	74	78	81	85	88	92	96	99	103	106	110	114	117
53	55	59	63	67	71	75	79	83	87	91	95	99	103	107	111	115	119	123	127
55	58	63	67	71	76	80	84	89	93	97	102	106	110	115	119	124	128	132	137
57	61	66	71	75	80	85	90	95	99	104	109	114	119	123	128	133	138	142	147
59	64	69	74	80	85	90	96	101	106	111	117	122	127	132	138	143	148	153	159



Le Milieu de "Cristales"

- Dans "L'Inferno", au Niveau 590: Humidex: 112...



relative humidity [%]

45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
22	22	23	24	24	25	26	26	27	28	29	29
24	25	26	27	28	28	29	30	31	31	32	33
27	28	29	30	31	32	33	33	34	35	36	37
30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
33	35	36	37	38	39	40	41	42	43	45	46
37	38	39	40	42	43	44	45	47	48	49	50
40	41	43	44	46	47	48	50	51	53	54	55
43	45	47	48	50	51	53	54	56	57	59	61
47	49	51	52	54	56	58	59	61	63	64	66
51	53	55	57	59	61	62	64	66	68	70	72
55	57	59	61	63	66	68	70	72	74	76	79
59	61	64	66	69	71	73	76	78	81	83	85
63	66	69	71	74	77	79	82	85	87	90	93
68	71	74	77	80	83	86	88	91	94	97	100
73	76	79	82	86	89	92	95	99	102	105	107
78	81	85	88	92	96	99	103	106	110	114	117
83	87	91	95	99	103	107	111	115	119	123	127
89	93	97	102	106	110	115	119	124	128	132	137
95	99	104	109	114	119	123	128	133	138	142	147
101	106	111	117	122	127	132	138	143	148	153	159

TECHNIQUES D'EXPLORATION



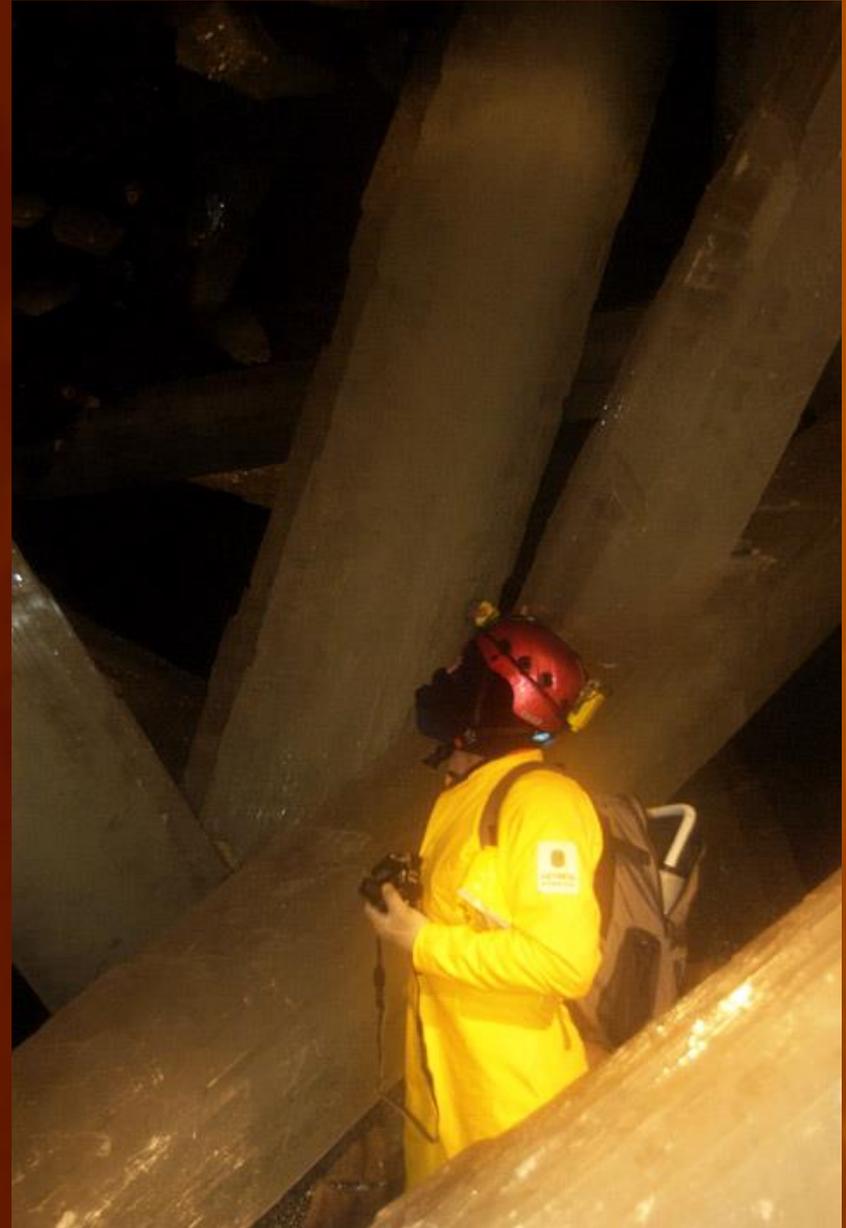
Techniques d'Exploration

- **Première approche :**
- **Vêtements légers, pas de protection pour les poumons.**
- **Dans ces conditions, le temps de permanence sûre était de 3 minutes.**



Techniques d'Exploration

- **Deuxième approche :**
- **Vêtements lourds, surface externe étanche et un refroidissement de l'air primitif.**
- **Le temps «sûr» de permanence saute à 15 minutes.**



Techniques d'Exploration

- À la fin du 2005, nous avons décidé de développer un système pour permettre des explorations dans conditions aussi extrêmes.
- Nous avons immédiatement exclu les systèmes de refroidissement actif pour leurs problèmes techniques énormes et le manque de fiabilité...



Techniques d'Exploration

- Notre situation était particulièrement bonne parce que nous pouvons utiliser une substance qui est souvent extrêmement dangereuse, mais qui a des merveilleuses propriétés thermodynamiques:
- **l'acide hydrique ...**
 - Enthalpie de fusion du “**monoxyde de dihydrogène**” (acide hydrique): 3.34×10^5 J/kg.
 - Absolument la plus haute...

Substance Heat of fusion (kJ/kg)

methane	58.41
ethane	95.10
acetone	97.99
ethanol	108.99
benzene	127.40
acetic acid	192.09
stearic acid	198.91
glycerol	200.62
formic acid	276.35
<i>hydric acid</i>	333.55

Techniques d'Exploration

- “Acide hydrique”, autrement dit: “eau”...
- La fonte de la glace absorbe beaucoup de chaleur, donc, on peut se protéger avec un'enveloppe de glace.
- Comme dans le profondeurs de l'Enfer, selon Dante.
- Dans la “Ptoloméé”...



Techniques d'Exploration

- La première Tolomea.

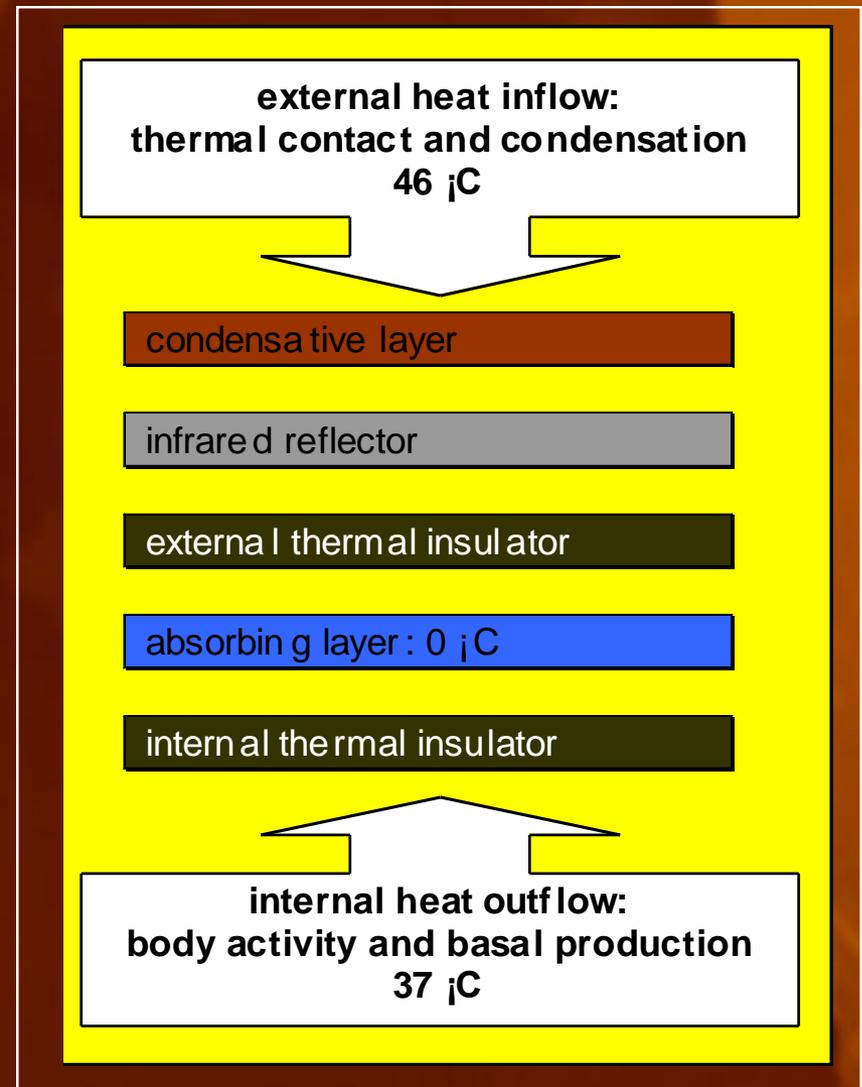
*Noi passammo oltre, là 've la gelata
ruvidamente un'altra gente fascia, (...)
Cotal vantaggio ha questa Tolomea,..*

Inferno, XXXIII



Techniques d'Exploration

- Les quatre principaux modèles de Tolomea ont été développés avec Ferrino SpA.
- Les systèmes de congélation sont faites par Electrolux SpA.
- La couche de glace interne a une double fonction:
 - protéger le corp contre la chaleur entrant;
 - absorber le dégagement de chaleur du corps.



Techniques d'Exploration

- **L'efficacité du blindage dépendante fortement de l'activité faite à l'intérieur de la grotte.**
 - Libération basique de chaleur: 100 W
 - Activité: 2-300 W
 - Apport externe de chaleur: 1-200 W
- **Le Tolomea a une capacité d'absorption de chaleur autour -400 Wh.**



Techniques d'Exploration

- Le refroidissement de l'air est indispensable pour la respiration et la protection des yeux.
- Le système de refroidissement a gagné le nom "Sinusit".
- Les dernières modèles Sinusit-5 e 6, sont désormais satisfaisants.
- Sinusit-5 a une capacité de -300 Wh, capable de refroidir à 20 °C environ 6 m³ d'air de "Cristales".



Techniques d'Exploration

- Le système de refroidissement Tolomea-Sinusit a permis de rester jusqu'à 80 minutes où il ya deux ans 15 étaient redoutables.
- Le temps total passé dans “Cristales” par l'un de nous, jusqu'à présent, est 46 heures...
- Le système a permis d'explorer et étudier la grotte dans des conditions de sécurité ..



• **Merci de votre attention**





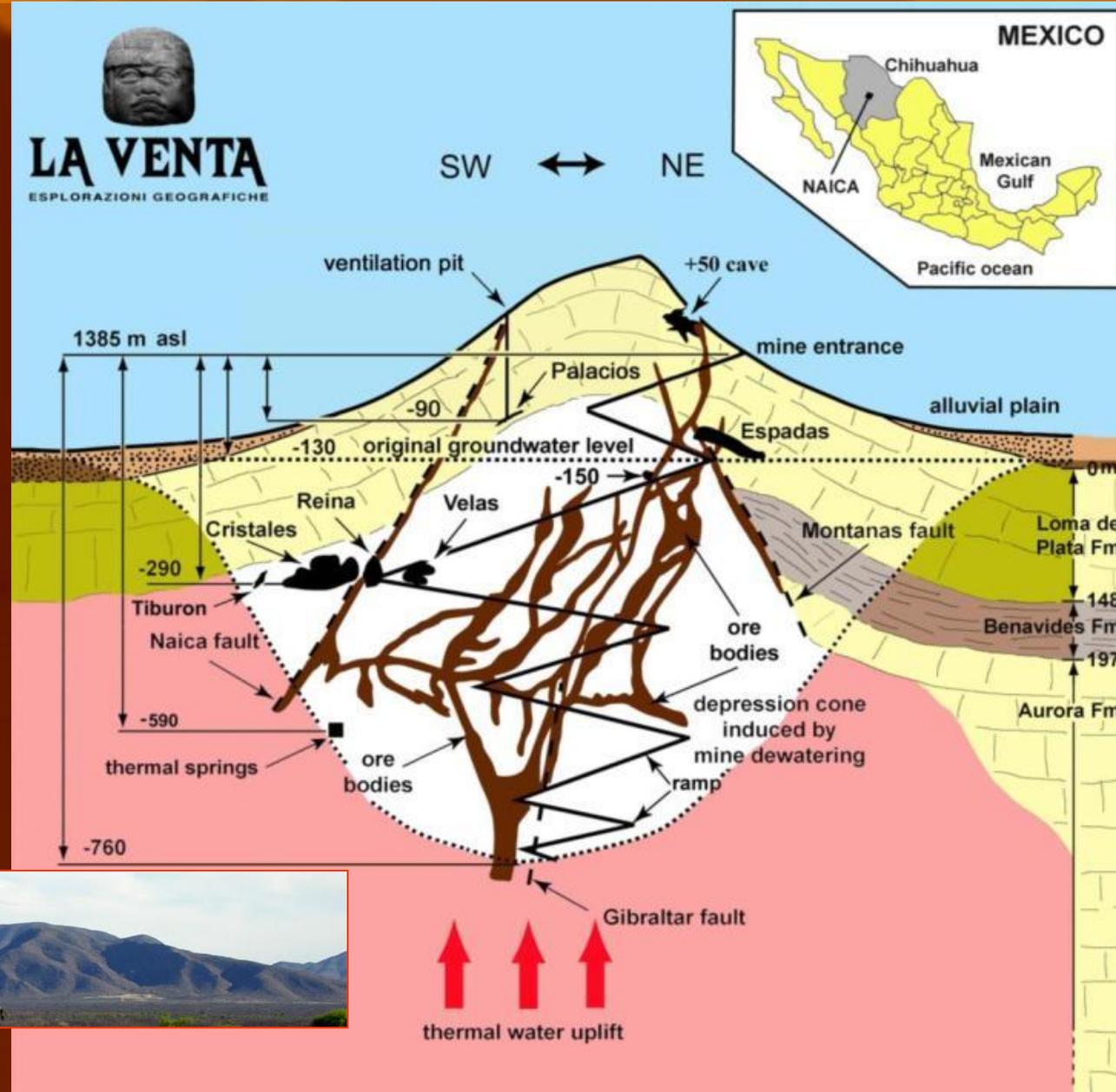
Les Resultats du "Proyecto Naica"

Giovanni Badino



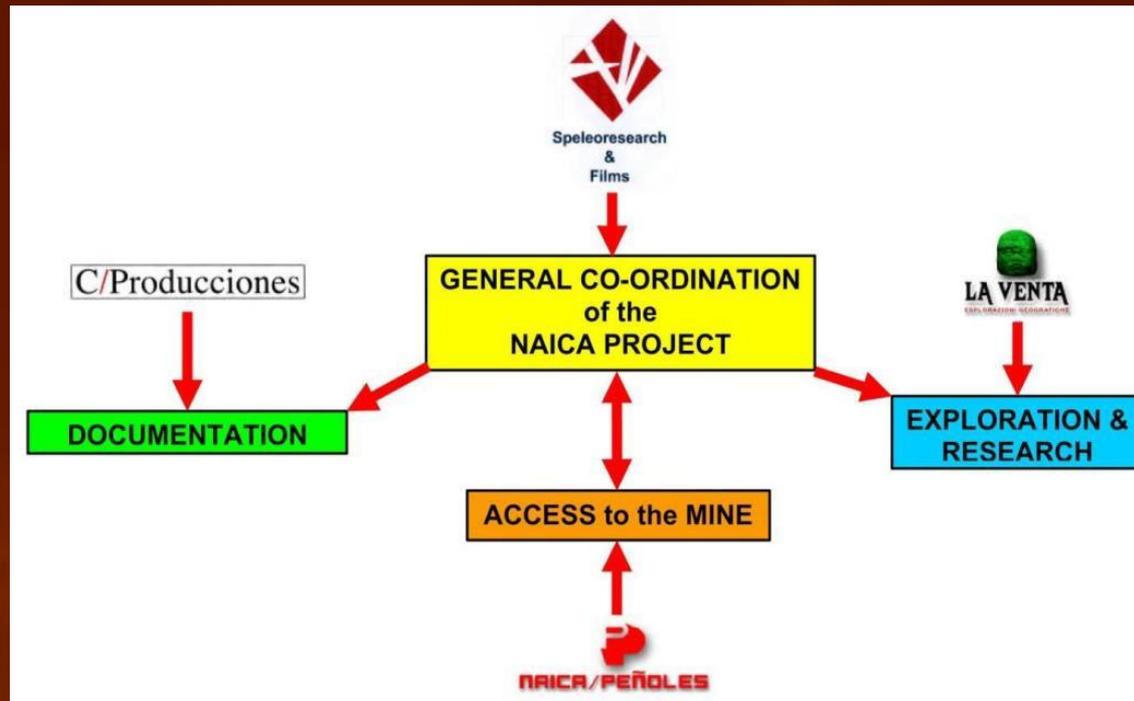
La Mine de Naica

- A la profondeur de 1200 m sous la surface une "batholite" Oligocénique était responsable de la formation des corps minéralisés. Maintenant elle provoque la montée de l'eau chaude.



Le Projet Naica

- Il s'agit d'un projet multidisciplinaire commencé en 2006 pour explorer, documenter et étudier les grottes de Naica dans tous leurs aspects.
- Jusqu'à présent une quarantaine d'articles scientifiques ont été publiés sur les grottes de Naica.
- Résumons...



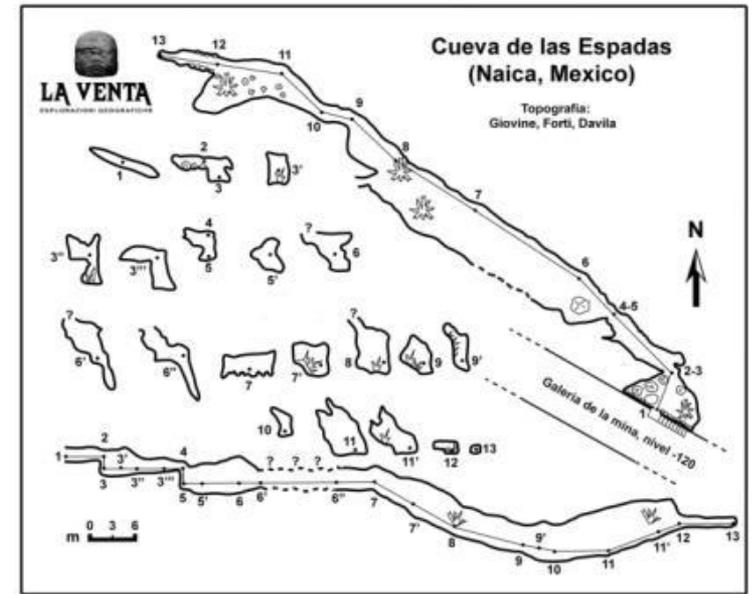
Le Dessin des Grottes

- Explorer, documenter et cartographier les grottes a pris plus de quatre ans et 300 heures de travail.



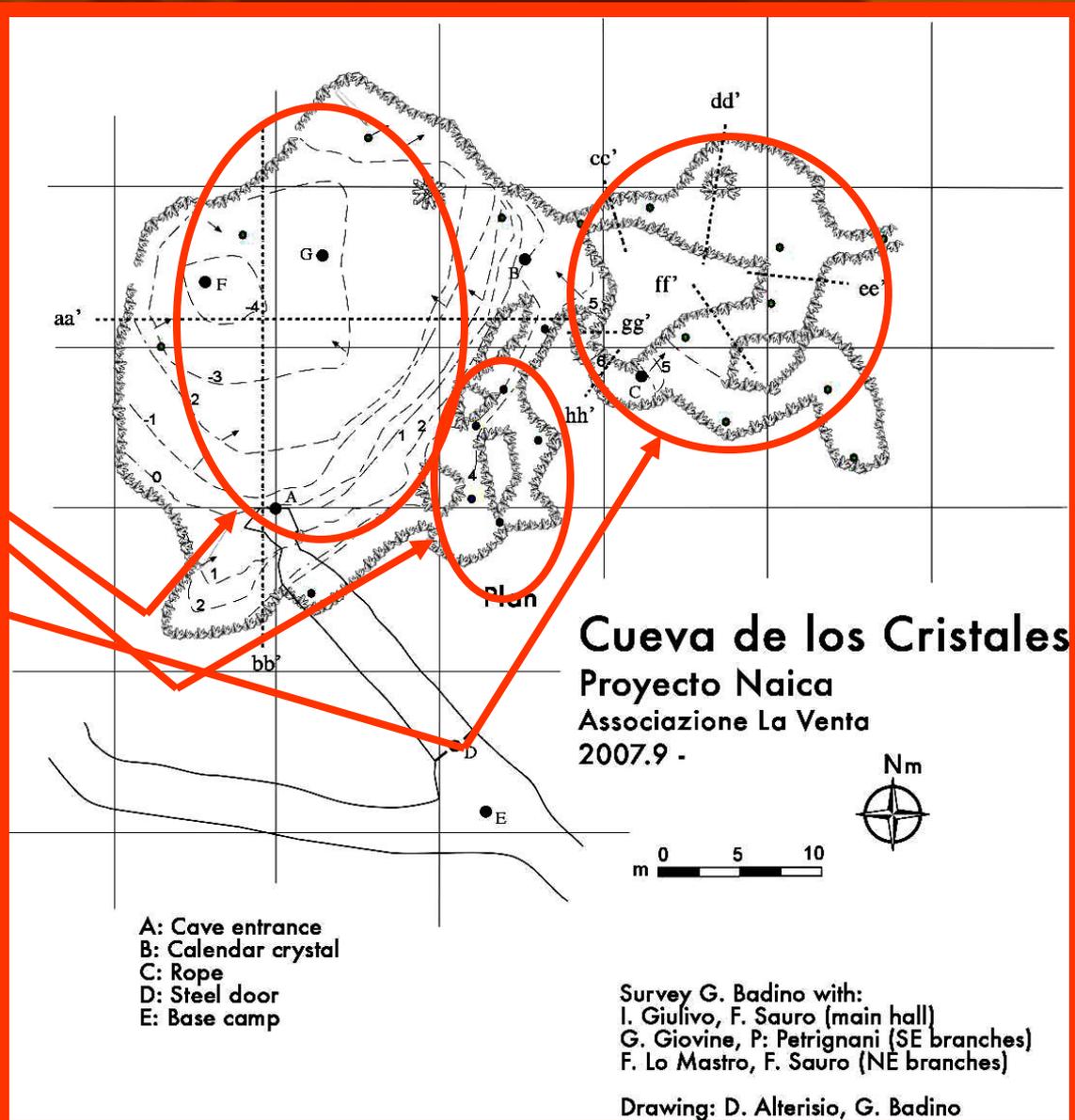
Le Dessin des Grottes

- Toutes les grottes connues ont été cartographiées.



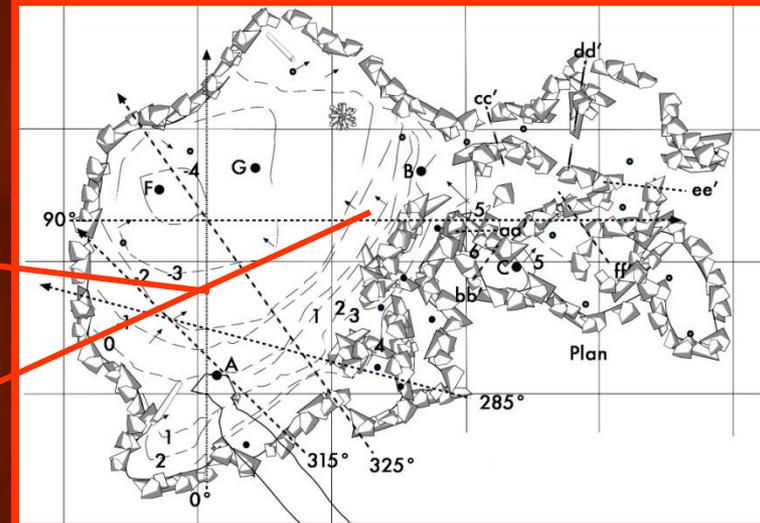
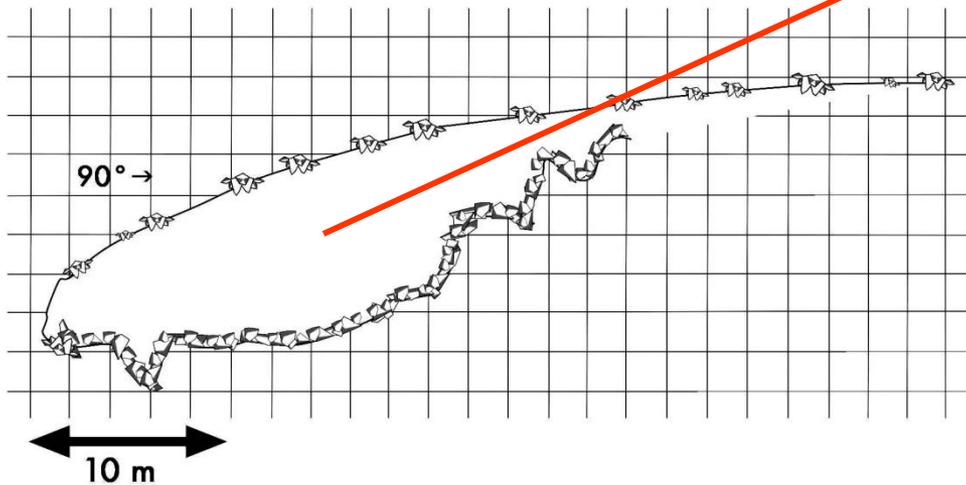
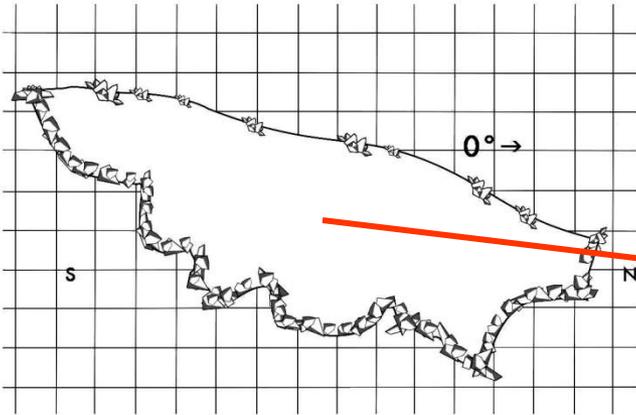
Le Dessin des Grottes

- Voici la topographie de Cristales:
- Salle principale: 109 m
- Branches de la SE: 42 m
- Branches de NE: 68 m
- Total: 217 m

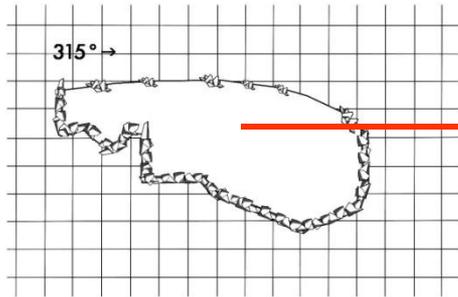
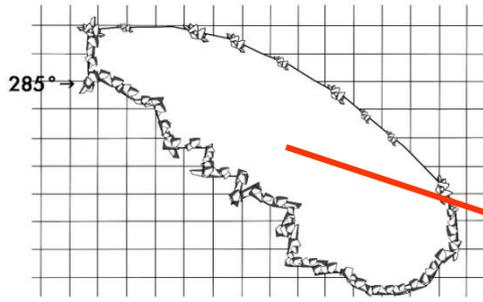


Le Dessin des Grottes

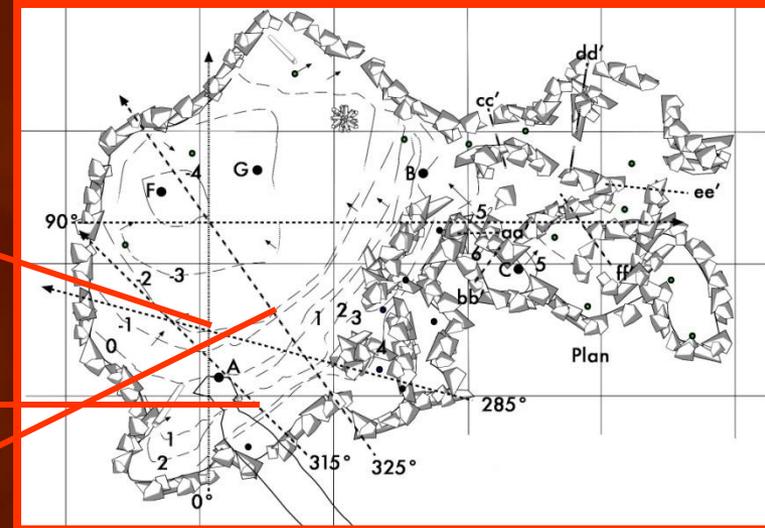
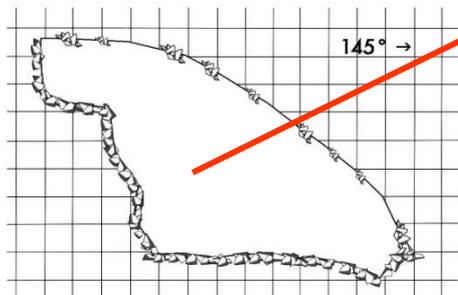
- La profondeur de Cristales et d'environ 12 mètres...



Le Dessin des Grottes



10 m



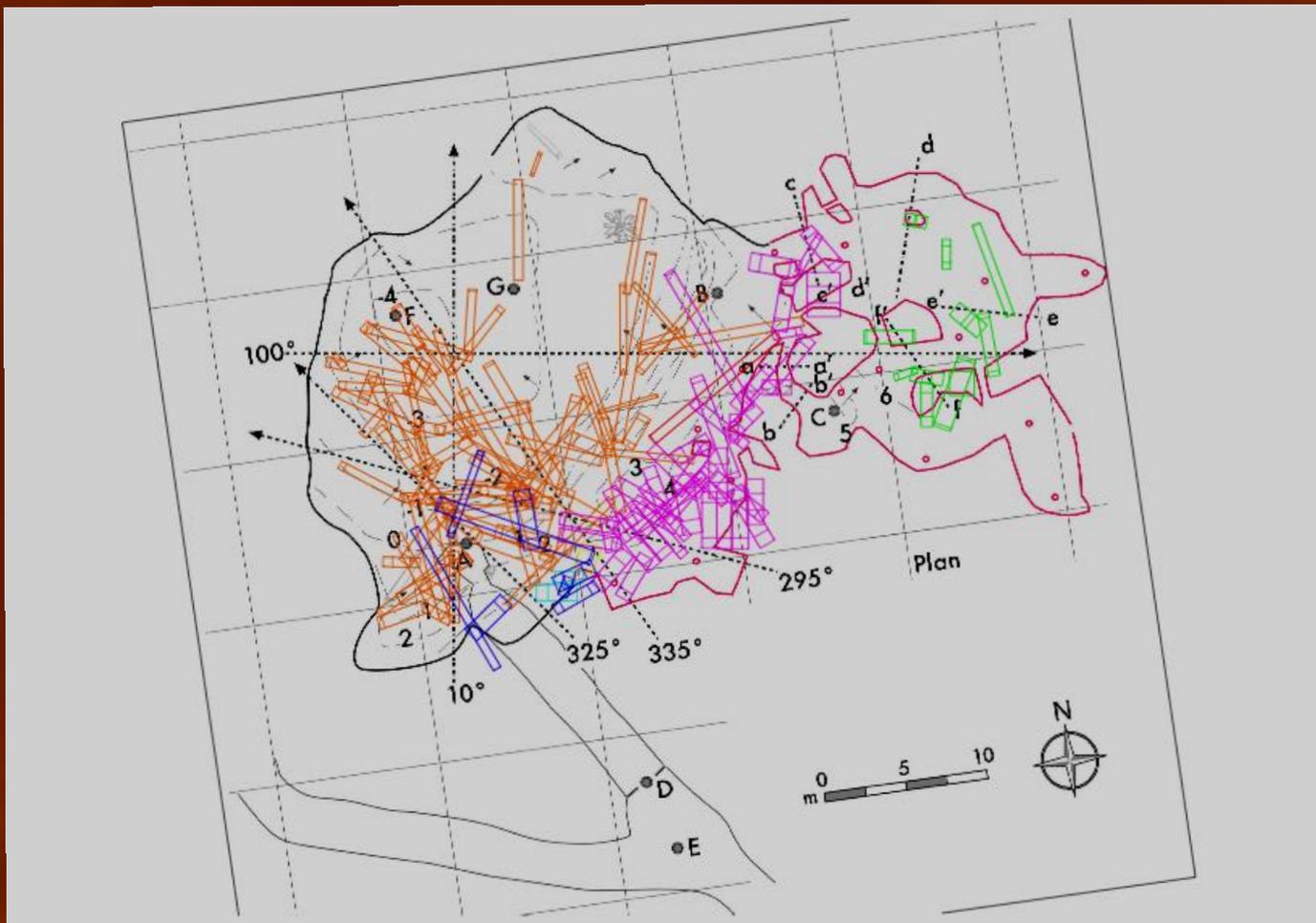
Le Dessin des Grottes

- La surface de Cristales est d'environ 1100 m², avec un volume de 5 à 6000 m³.



Le Dessin des Grottes

- Nous avons créé un registre des mégacristsaux, avec mesures des dimensions et orientation de 162 individus.

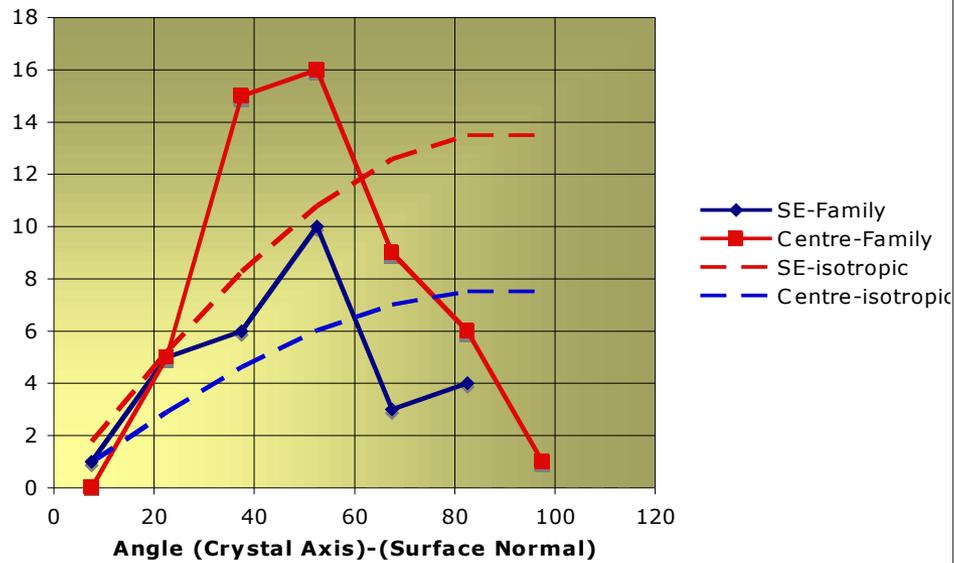


Le Dessin des Grottes

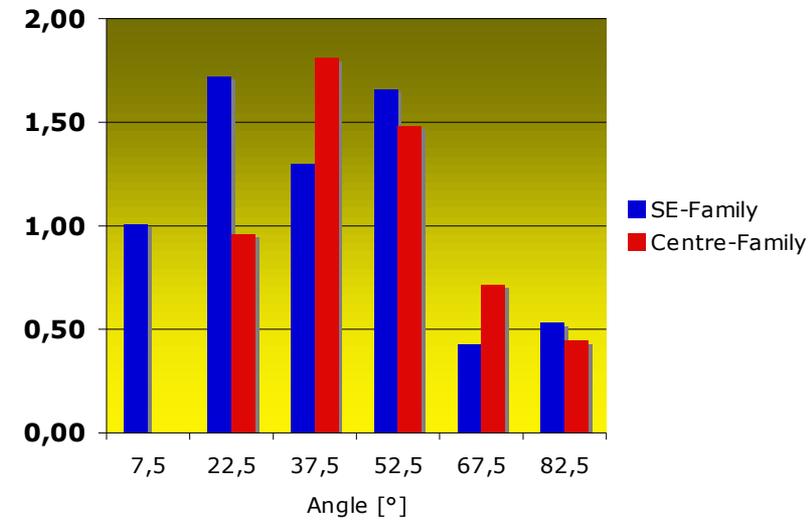


Le Dessin des Grottes

Axis-Surface Angle Distribution

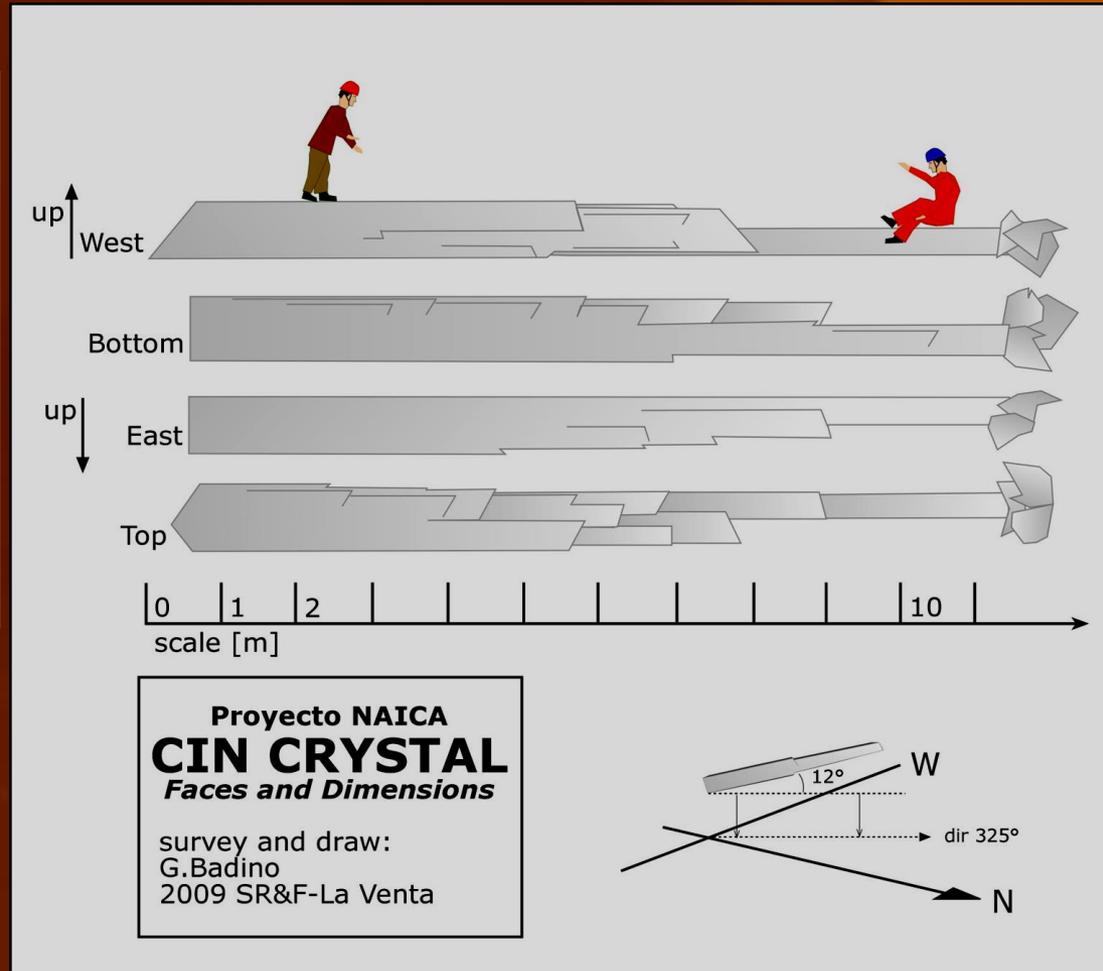


Distribution Angle Axis-Surface



Crystal Cin

- Le plus grand cristal se trouve dans la region NE.
- Longueur : 11.40 m
- A la base : $0.78 \times 0.92 \text{ m}^2$
- Au sommet : $0.35 \times 0.35 \text{ m}^2$
- Volume : 5.0 m^3
- Masse : environ 11 tonnes



Crystal Cin

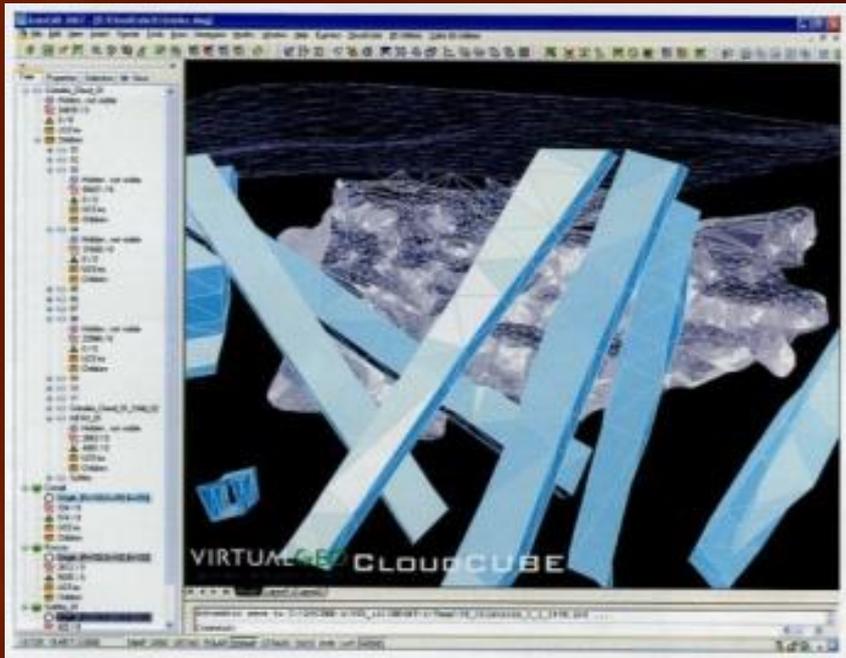


Crystal Cin



3D

- Nous avons fait un test de faisabilité de la topographie avec laser scanner.



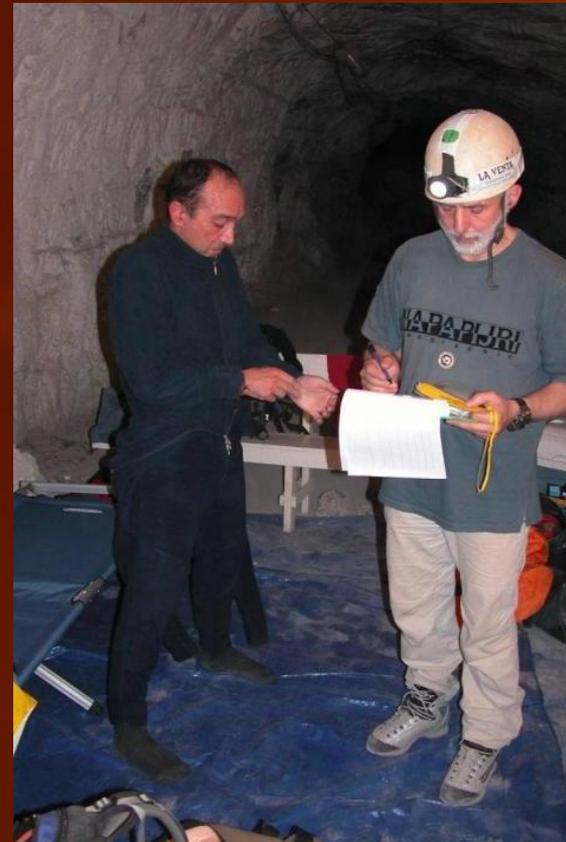
Documentation

- On a réalisé plusieurs documentaires internationaux et un film (C/Producciones).
- Les plans intérieurs ont été réalisés avec des robots spécialement conçus pour cette grotte.



Physiologie

- On a effectué des études sur les réactions de l'exposition du corps humain à ces conditions environnementales.



Micro-météorologie

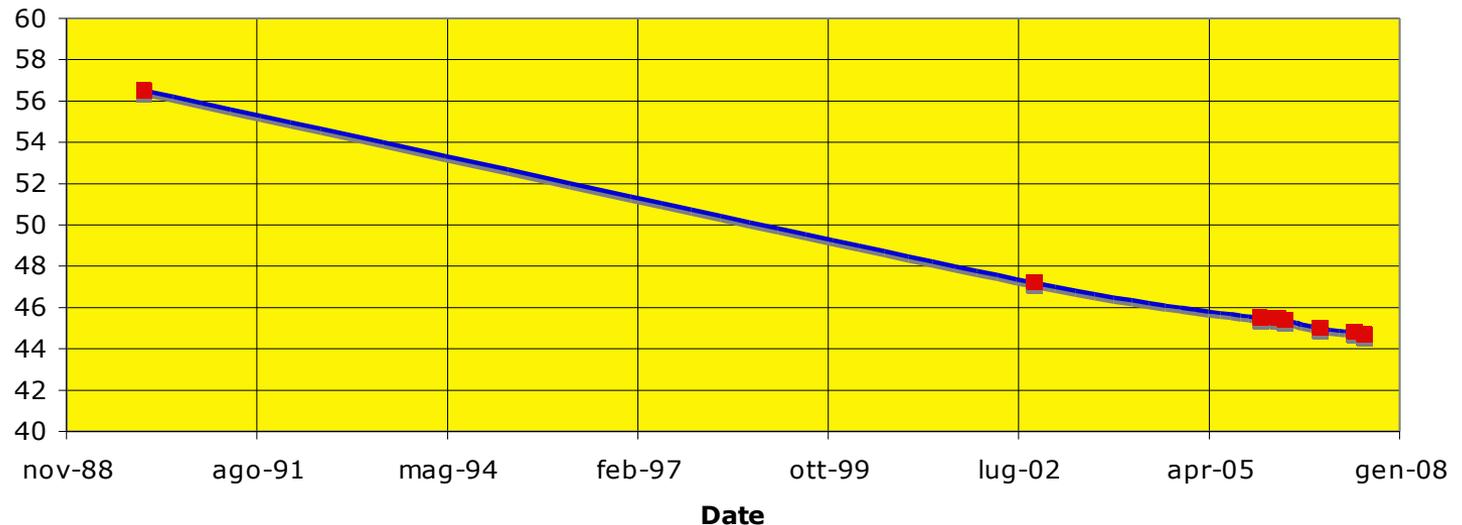
- Nous disposons de 5 ans de mesures de la météo intérieure, dont les deux dernières années avec des instruments de haute précision (± 4 mK).



Micro-météorologie

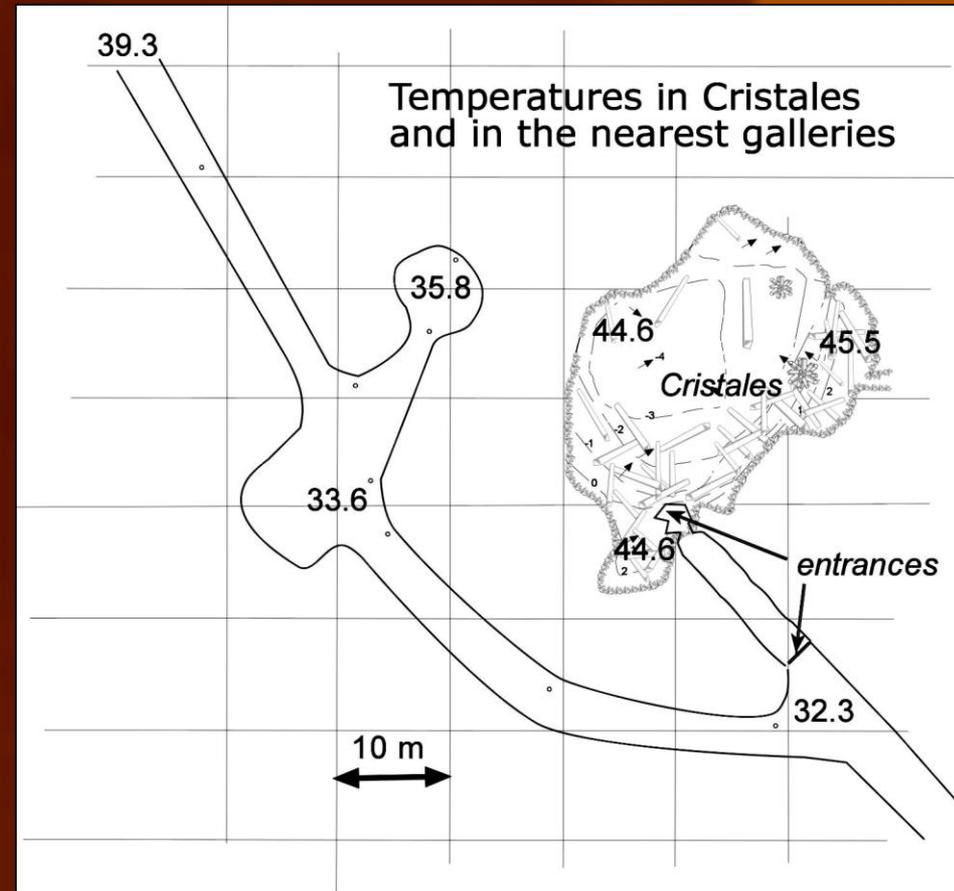
- Les données montrent un refroidissement de la grotte, $0,52 \text{ °C/a}$.
- La tendance est cohérente avec une température initiale (1990) d'environ $53\text{-}57 \text{ °C}$, la même température qui est suggérée par l'étude des inclusions dans les cristaux.
- La grotte se refroidit en raison du contact thermique avec les conduits de mines, qui ont localement une température autour de $34\text{-}38 \text{ °C}$.

Temperatures in Cristales



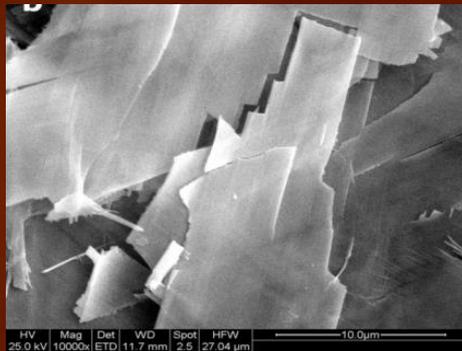
Micro-météorologie

- Il est possible d'estimer l'origine des pertes de chaleur.
- La grotte est en train de perdre environ 200 W.
- Les données montrent que la capacité thermique des cristaux intérieurs est seulement de 2 à 3% de la capacité totale mesurée...
- Donc, Cristales est seulement une petite partie d'une grotte bien plus grande...

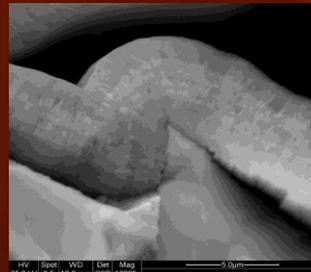


Minéralogie

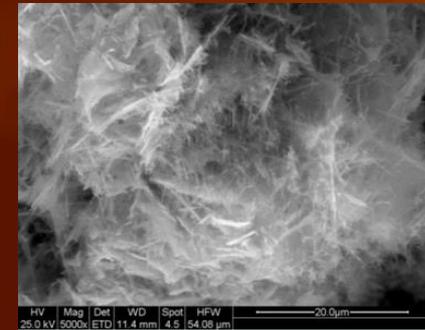
- Dans les grottes de Naica, il a été détecté 41 minéraux, dont 10 inconnus jusqu'à présent dans les grottes.



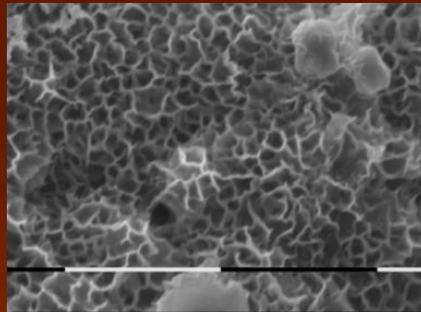
woodruffite



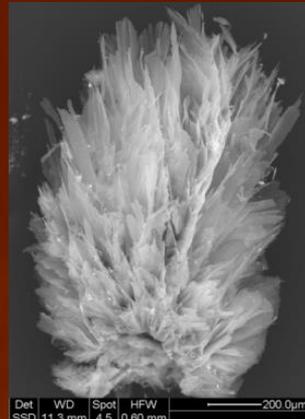
**Undetermined
Mg-silicate**



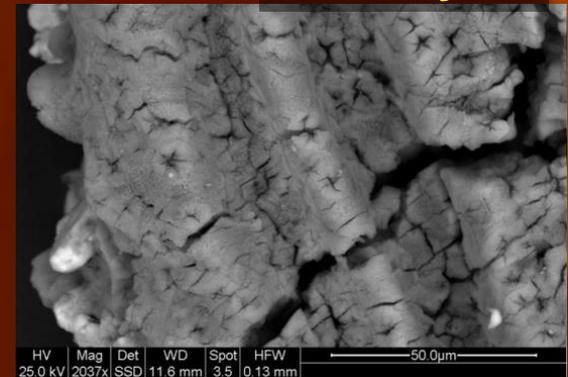
orientite



hectorite



coronadite



starkeyite

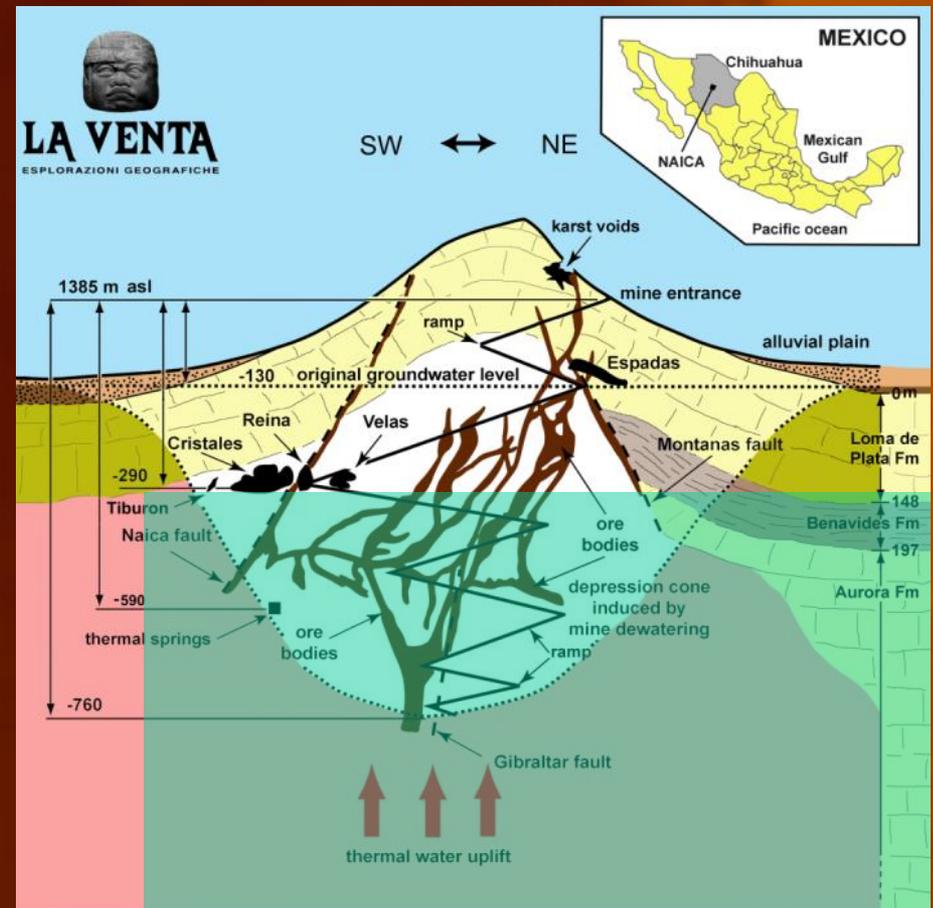
Les Questions Principales

- Pourquoi et comment se sont développés ces grands cristaux?
- Quand ont-ils commencé à se développer?
- Y-a-t'il eu, en quelque sorte, un role des micro-organismes dans leur croissance?
- Quel sera l'avenir des cristaux?



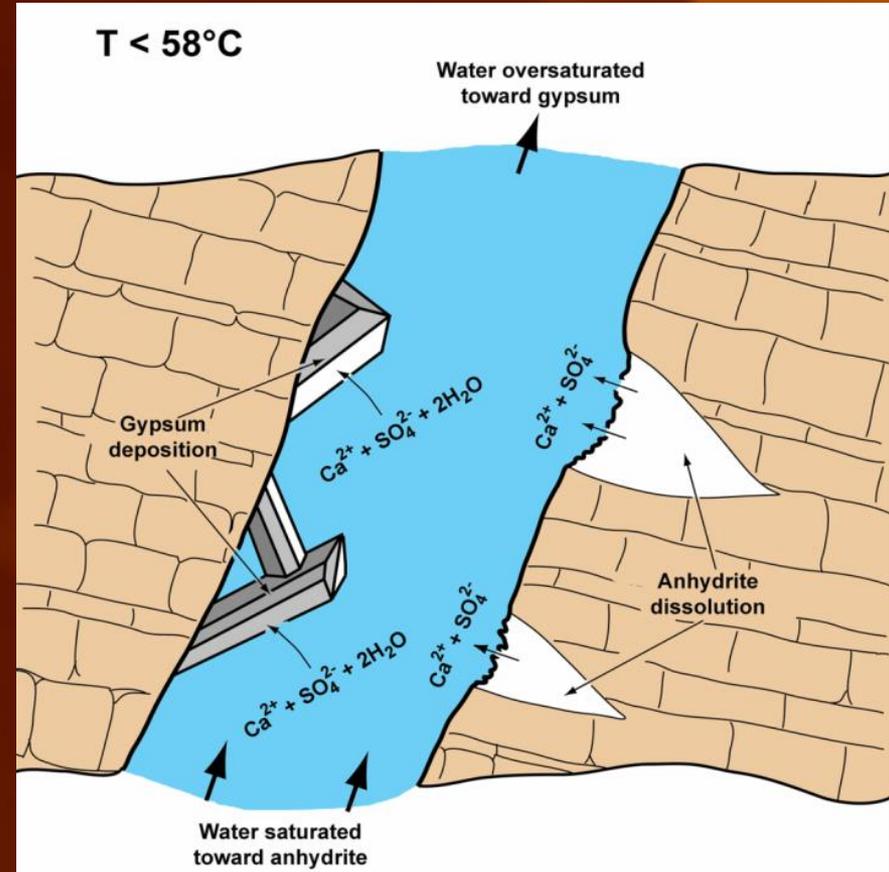
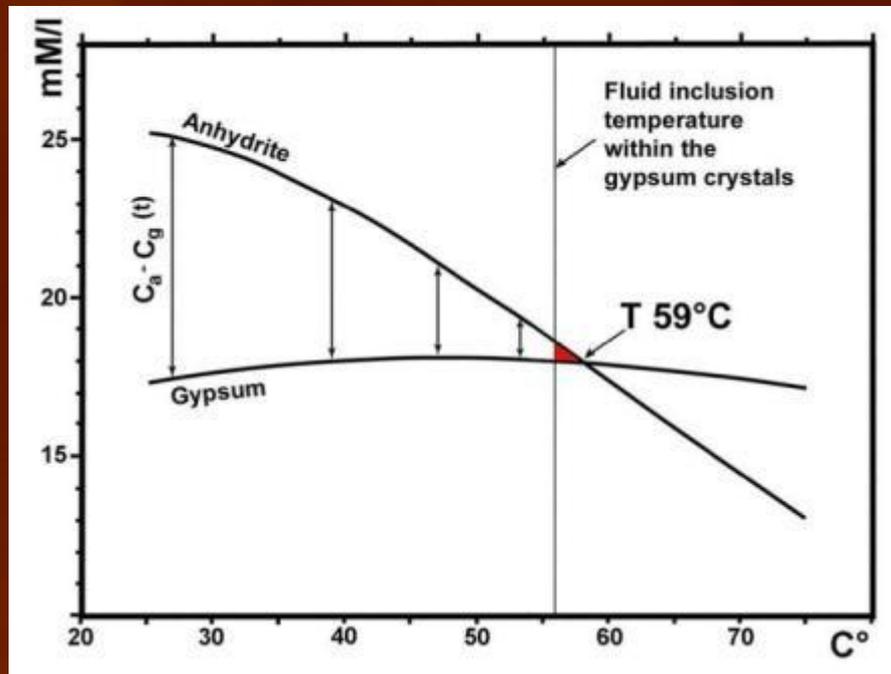
Pourquoi?..

- D'une manière générale, pour obtenir des cristaux géants, il est nécessaire d'avoir un environnement très stable et légèrement sursaturé.
- La présence d'un immense nappe phréatique thermique sans rejet direct sur la surface a permis de maintenir la température presque inchangée pendant des centaines de milliers d'années.



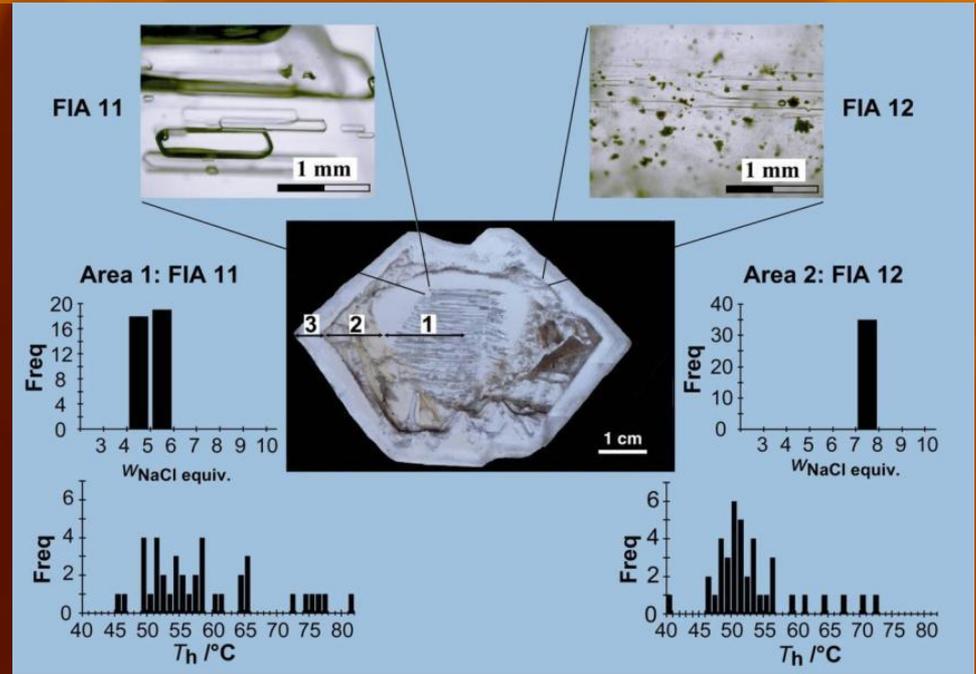
Pourquoi?..

- Le mécanisme principal de formation est gouverné par le déséquilibre de solubilité entre l'anhydrite et le gypse.



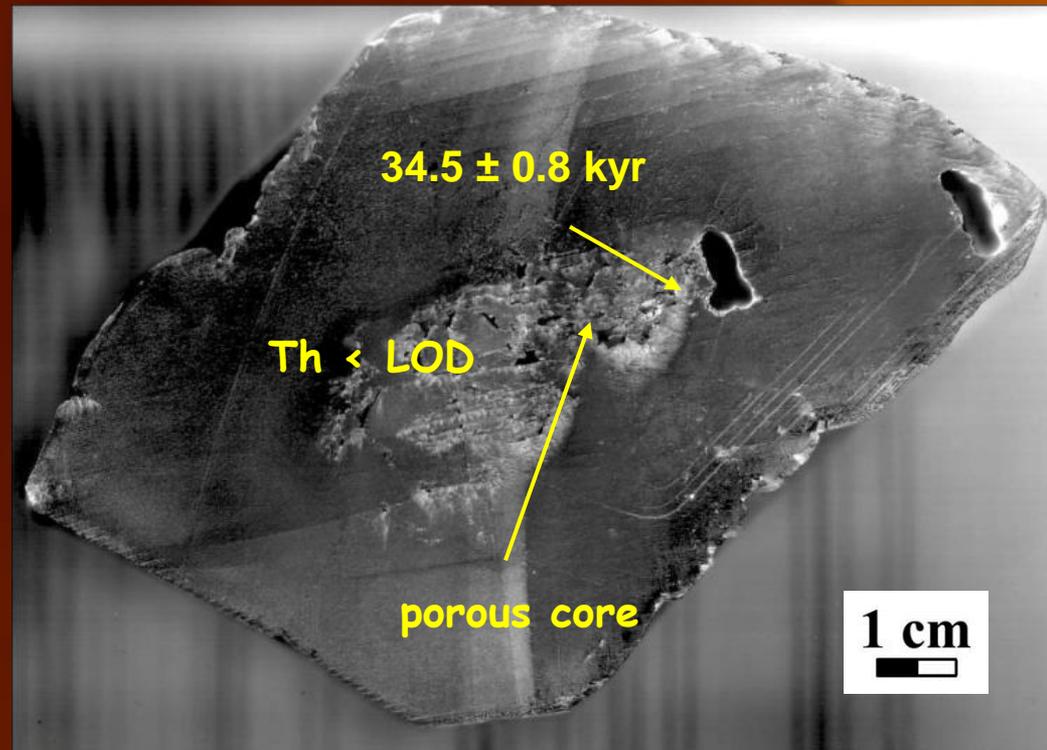
Pourquoi?..

- L'étude des inclusions fluides a permis de définir la salinité et la température de l'eau d'alimentation au moment du dépôt.



Quand?..

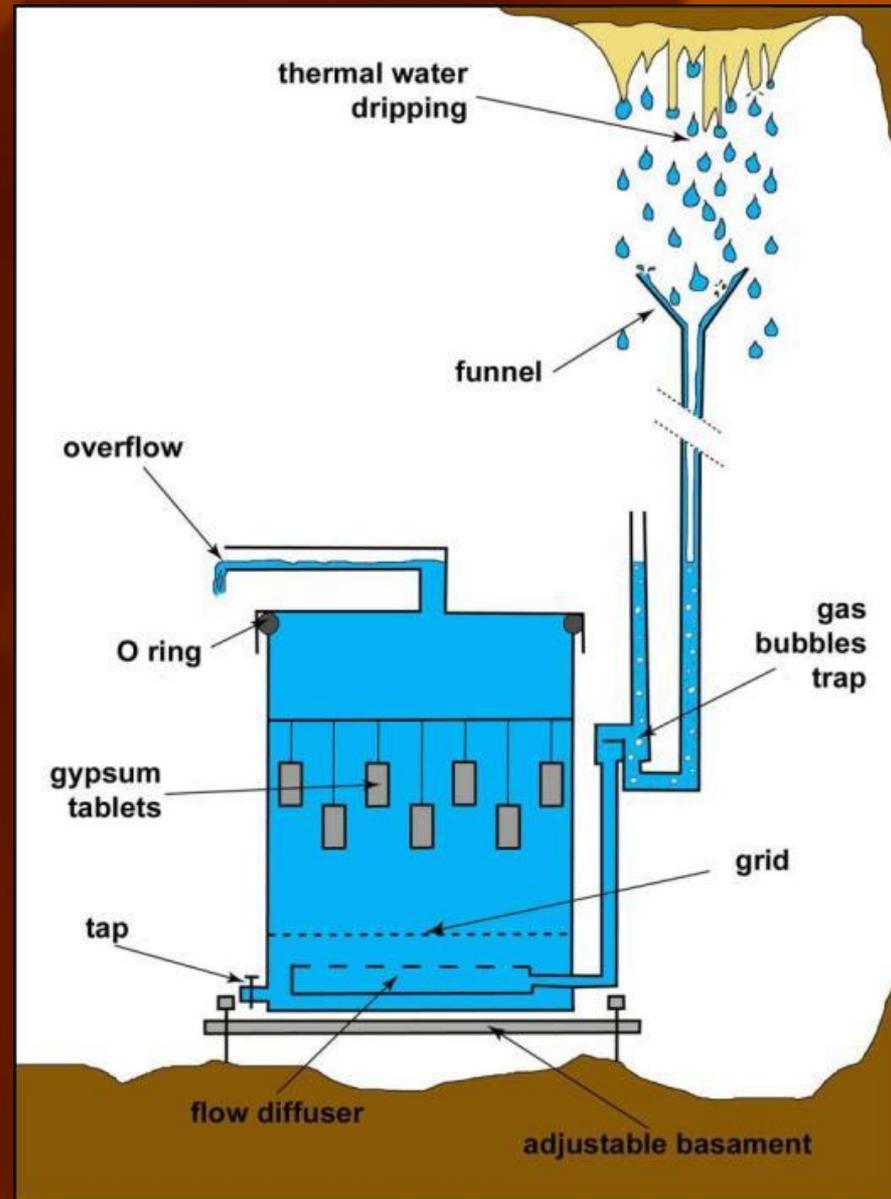
- Depuis 2008, plusieurs mesures U/Th ont été faites.
- Sur la base de données, les plus grands cristaux ont un âge de $250.000 \pm 50,000$ ans.



La première datation U/Th a été faite environ 5 cm sous la surface d'un cristal de gypse.

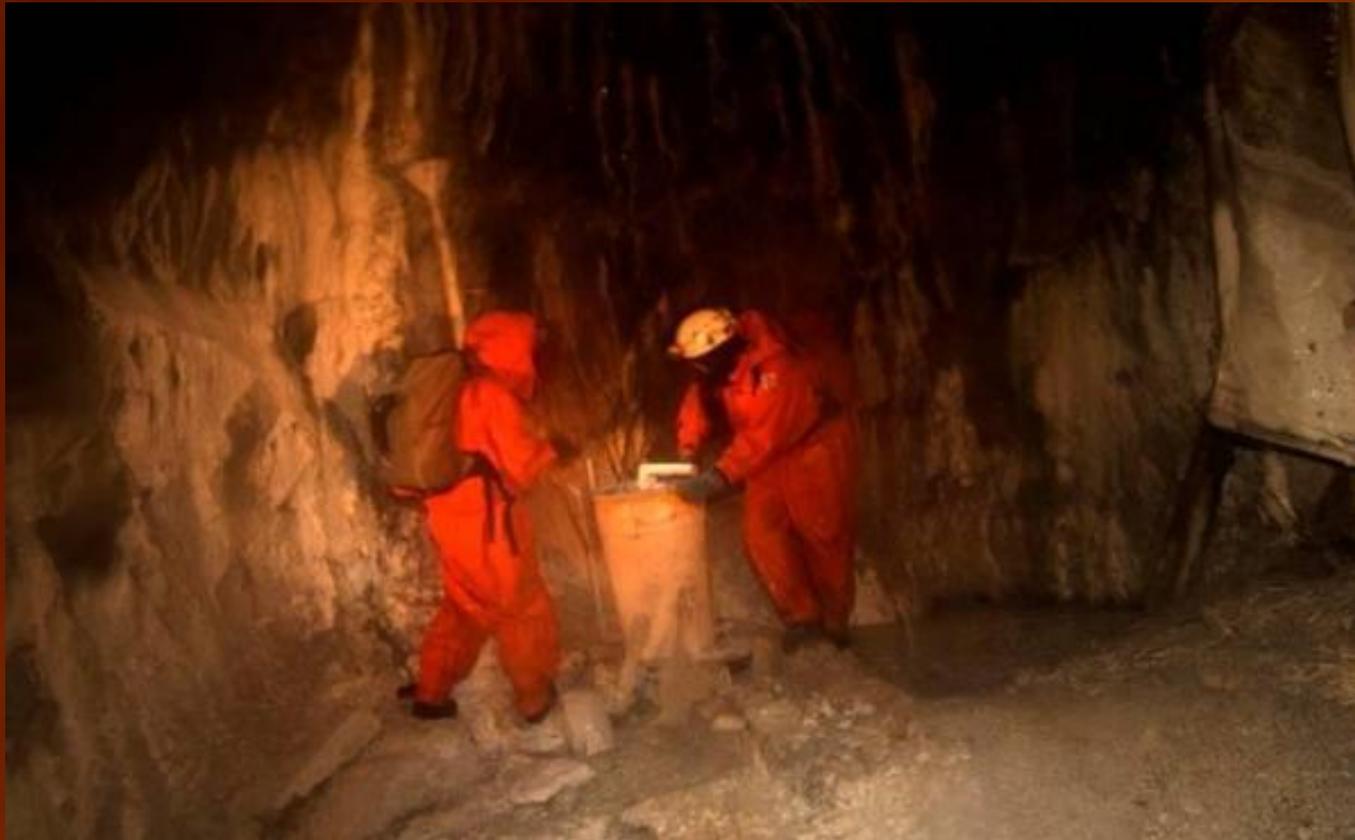
Quand?..

- Une autre méthode pour définir l'âge des plus gros cristaux est de mesurer la vitesse effective de croissance.
- Nous avons élaboré et réalisé un dispositif spécifique pour reproduire la déposition des cristaux dans les parties plus profondes de la mine.



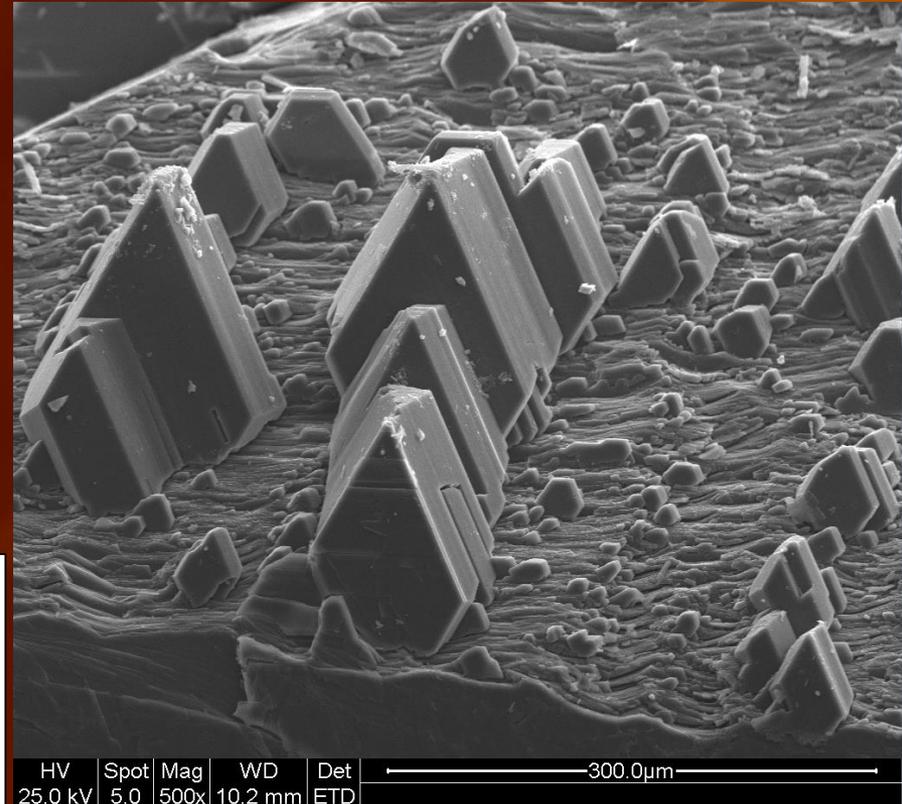
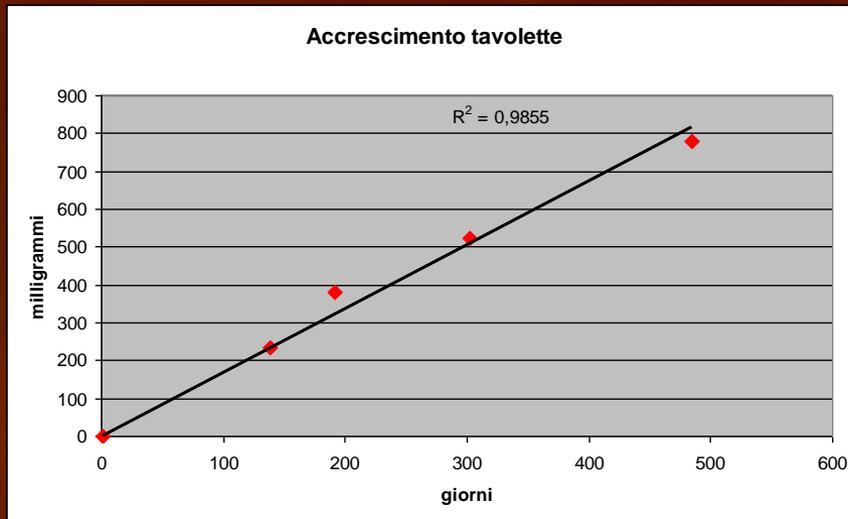
Quand?..

- Le récipient a été placé pendant trois ans au Niveau 590 dans un endroit absolument hostile, avec une température de 49,5 °C et 100% d'humidité relative.
- On l'a nommé: "L'inferno!"



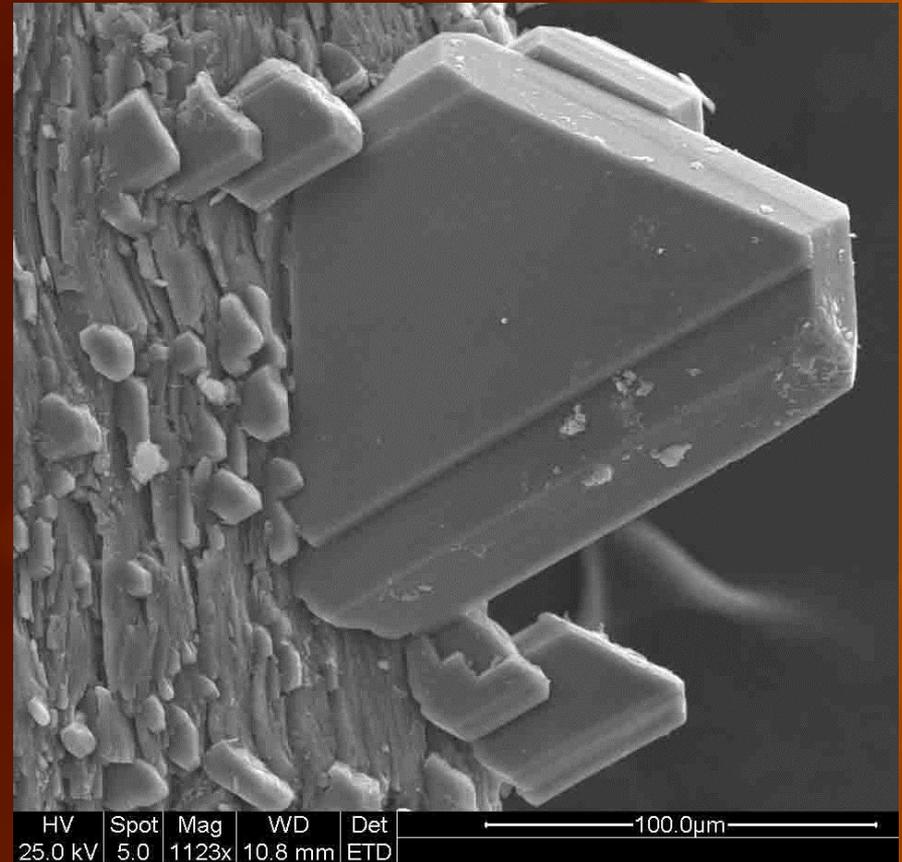
Quando?..

- Le développement des cristaux dans le dispositif était régulier, ce qui a permis une bonne évaluation de la vitesse de croissance.
- La forme des cristaux «bébés» est exactement la même que celle des cristaux géantes.



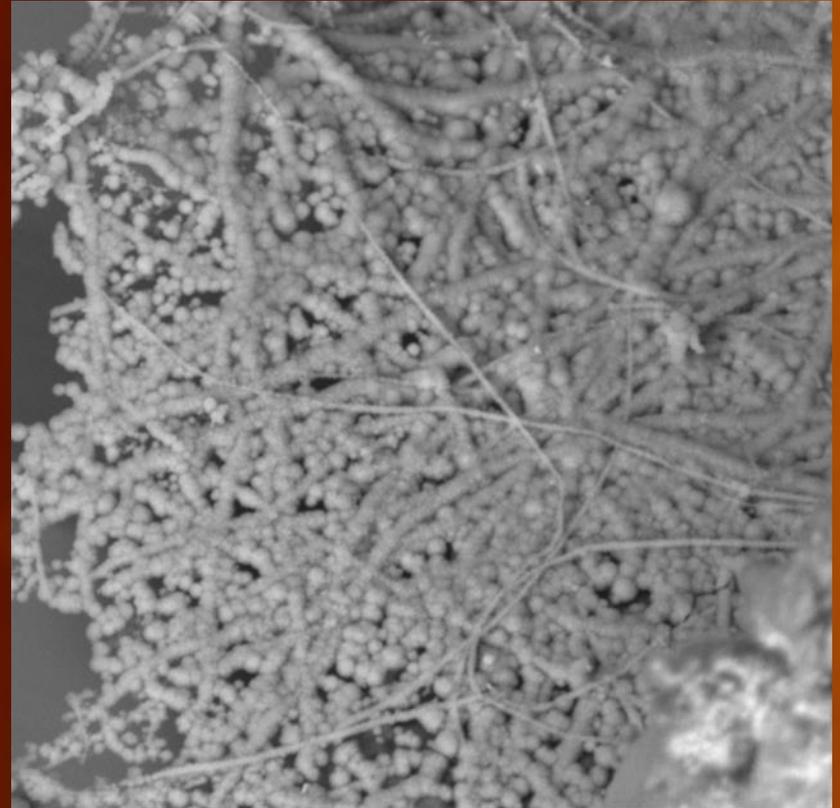
Quand?..

- En prenant en considération l'effet de la température sur la super-saturation, la vitesse donne un âge des plus grands cristaux d'environ 250,000 ans.



Biologie?..

- **Structures biogènes fossilisées sont piégées à l'intérieur des cristaux.**
- **Elles étaient «fossilisées» par les minéraux en développement sur elles.**
- **Il est donc fort possible que des organismes vivants survivent encore dans les inclusions fluides.**



Biologie?..

- Dans les inclusions fluides, de la matière organique a été trouvée à partir de laquelle il a été possible d'extraire l'ADN.
- On pourra, ainsi, connaître le type de bactéries capables de survivre aux conditions environnementales extrêmes de ces cavernes.



Biologie?..

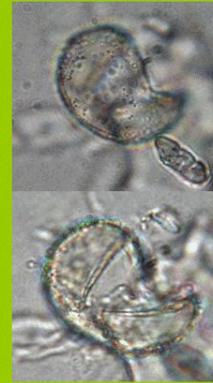
- Une structure biogénique particulière est représentée par les pollens.
- Ils peuvent nous dire beaucoup sur la végétation à la surface extérieure à l'époque de la formation des cristaux.
- Il a été extrait 60 grains de pollens des dépôts de grottes de Naica.



Biologie?..

- Il a été trouvé *Quercus garryana*, *Lithocarpus densiflora*, *Taxus*, *Plantago*, *Poaceae* et *Lycopodium*.
- Ces résultats suggèrent la présence, au moment du dépôt de gypse, d'une forêt humide comme celle actuellement présente dans le sud-ouest des États-Unis.

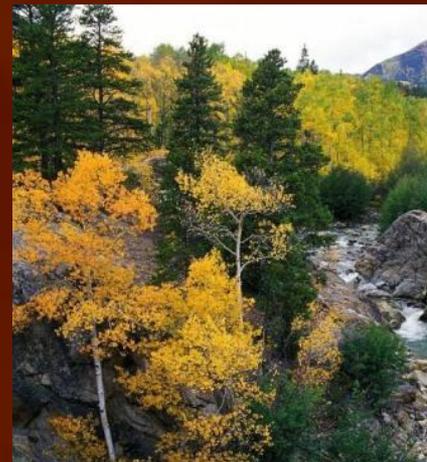
Most pollen has a good state of preservation



Taxus



Pinus



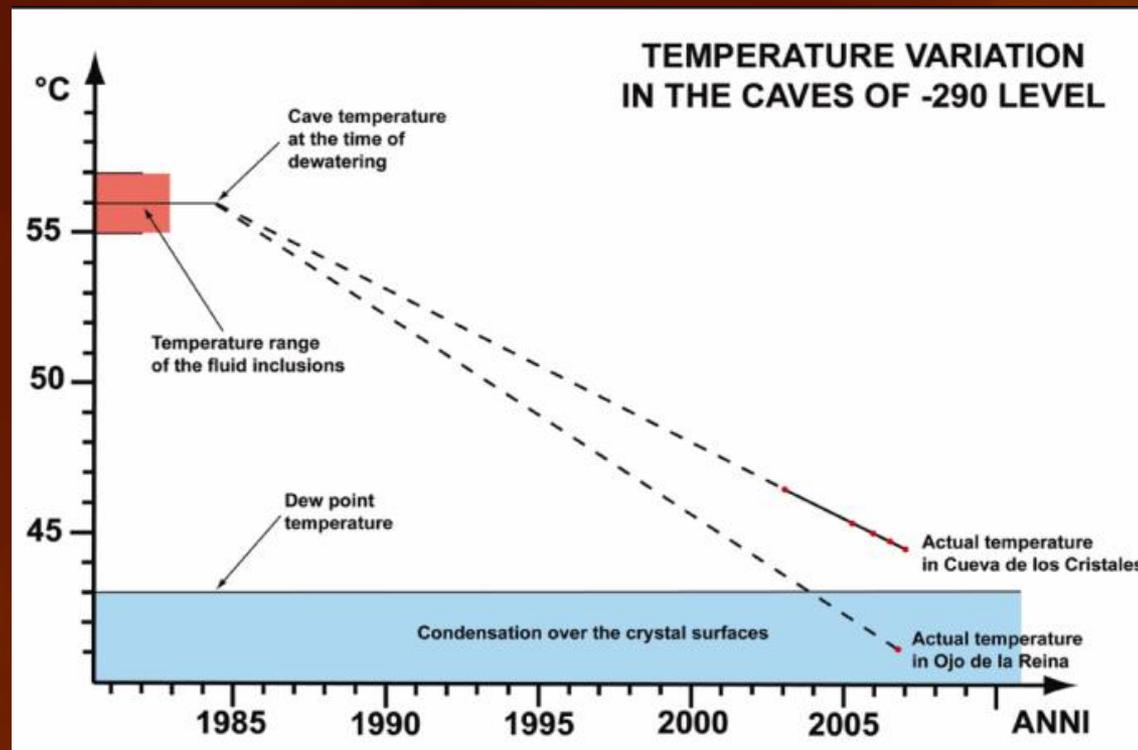
Quelle est le future de Naica?

- **Sans intervention humaine, les grottes ne survivront que quelques années à la suite des événements anthropiques et naturelles.**



Quelle est le future de Naica?

- Suite à la diminution de la température, dans la petite grotte, Ojo de la Reina, le point de rosée est atteint depuis environ 2004.
- La condensation a déjà provoqué des changements évidents, les cristaux de gypse se transforment en calcite.



Quelle est le future de Naica?



Quelle est le future de Naica?

- **En 2009 la condensation a commencé à se développer aussi à l'intérieur de la Cueva de los Cristales.**



Quelle est le future de Naica?

- Au maximum 5-10 ans, à la fin des activités minières, s'arrêtera le drainage.
- A l'arrêt de la mine le destin du village de Naica sera joué : il va disparaître.
- Ainsi, l'eau remontera à son niveau initial, avec les grottes sous 170 m d'eau chaude.



Quelle est le future de Naica?

- Dans la première phase du projet, nous avons appris à poser des questions à une structure sans comparaison avec tout ce que les êtres humains avaient vu, jusqu'à présent.
- Dans la deuxième partie du projet nous avons l'intention de poursuivre les explorations et, enfin, chercher les réponses aux questions posées ci-dessus
- Poursuivre les explorations pour tenter de découvrir le partie partie principale – beaucoup plus grande – des grottes de Naica.
- Mais depuis 2010, la société Penoles ne permet plus aucune recherche ou entrée dans les grottes de Naica.
- Maintenant nous essayons d'obtenir au moins la permission de construire une topographie tridimensionnelle de la grotte pour la mémoire future, avant qu'elle ne disparaisse à jamais de notre vue.
- Dans peu de temps, maintenant...



Merci de votre attention!

La cristallographie, la science des cristaux



Diamant



Emeraude



Rubis



Saphir

http://www.coeur-diamants.com/diamants_coeur_info.php?id=6
<http://leparanormal.forumactif.com/t4011-des-questions-sur-les-pierres>

<http://coeurdecristal1.forumactif.net/t2513-pierres>
<http://www.kiternaute.com/science/environnement/photo/visite-virtuelle-des-mineraux-du-museum-de-paris/coridon.html>

**Atomes, ions ou
molécules
arrangés dans
l'ordre : un cristal**



<http://www.ledd.fr/International/Europe/Images/Aout-2009/Ukraine-fete-d-independance-parade-militaire-Kiev-128450#highlight>

**Atomes, ions ou
molécules dans le
désordre : du gaz, du
liquide, ou du verre**



<http://www.mv73.fr/concerts-gratuits-region-2014-rouen/>

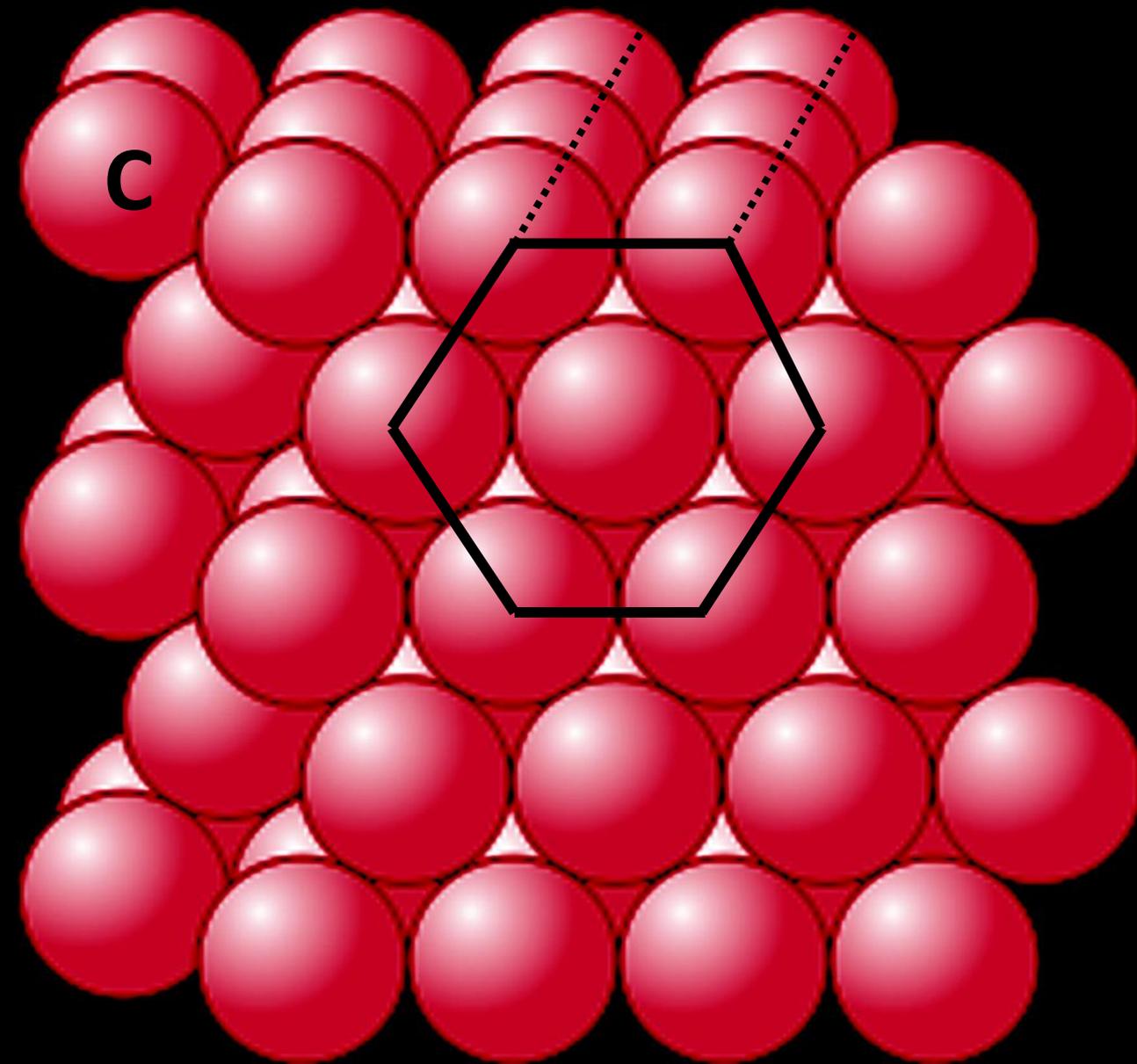


Photo Pierre Thomas

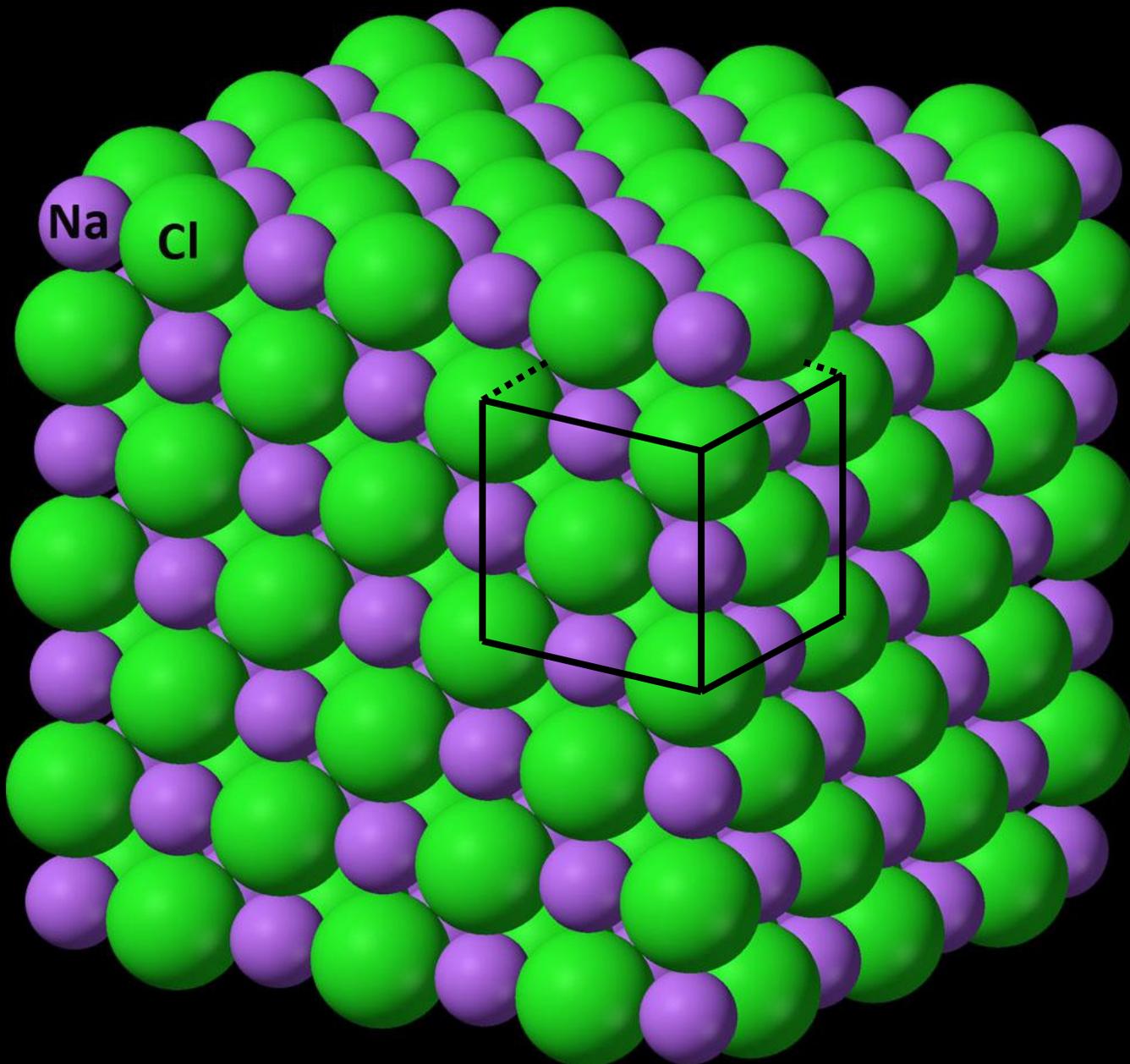
Analogie d'un
solide cristallisé

Analogie d'un
solide non
cristallisé (verre),
d'un liquide ...

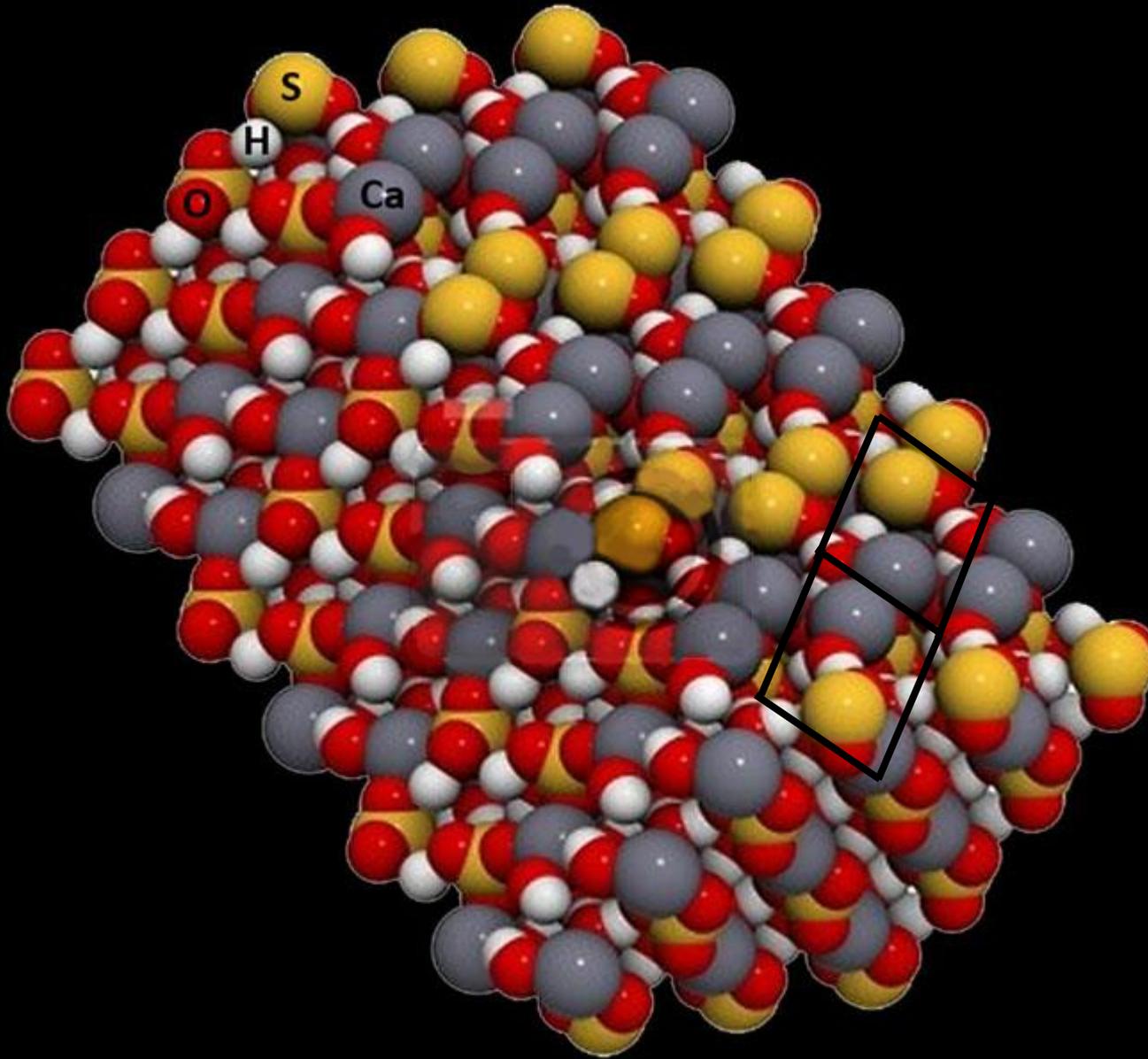
A basse température et/ou haute pression, le cristal est plus stable que le « désordre » et occupe un volume plus faible. C'est la forme d'équilibre vers laquelle tend la matière.



**Un exemple
d'arrangement
possible
« dans l'ordre » :
le cristal de
graphite
(carbone pur),
avec une maille
sous forme de
prisme
hexagonal.**

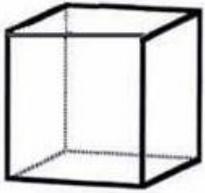


**Un autre
exemple
d'arrangement
possible : le
cristal
de sel (NaCl),
avec une maille
cubique,
empilées de
façon
« cubique ».**



Un troisième
exemple :
le Gypse
 $\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$,
le cristal de
Naica,
avec une
« molécule » à
12 atomes, ce
qui forme un
empilement
de mailles très
complexe.

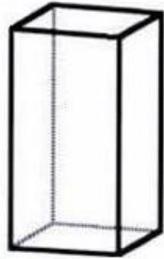
Les sept polyèdres qui définissent les sept systèmes cristallins



Cubique

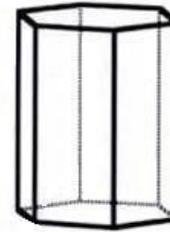
Cube :

faces carrées,
base carrée



Quadratique

Prisme droit à
base carrée



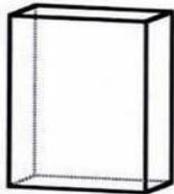
Hexagonal

Prisme droit à
base hexagonale



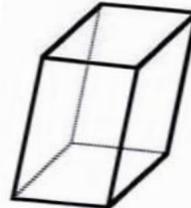
Trigonique (rhomboédrique)

Rhomboèdre



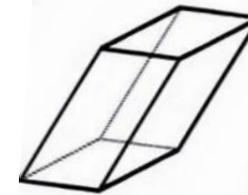
Orthorhombique

Prisme droit à
base rectangulaire



Monoclinique*

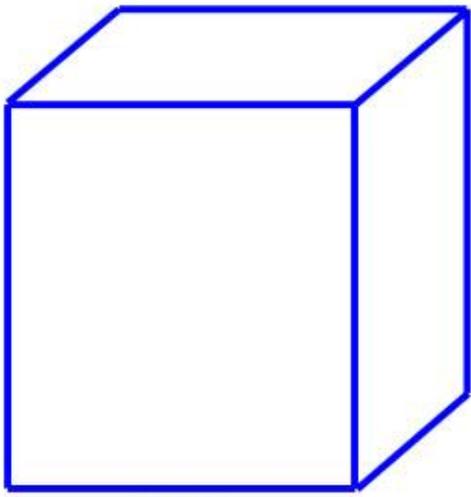
Prisme oblique à
base rectangulaire



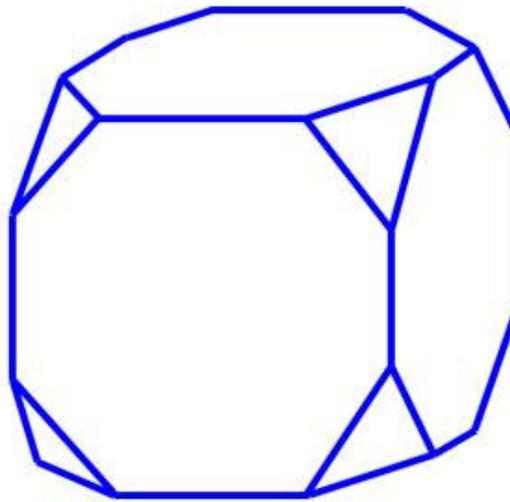
Triclinique

Prisme oblique sur
toutes les faces

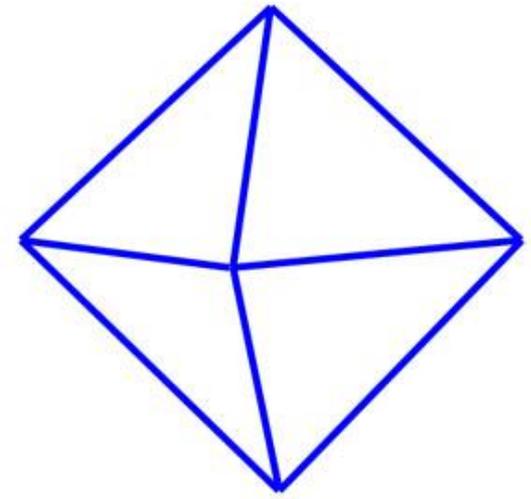
Géométriquement, il n'y a que sept manières d'empiler les mailles avec sept symétries possibles pour occuper complètement les trois directions de l'espace de façon « jointive » → les sept systèmes cristallins.



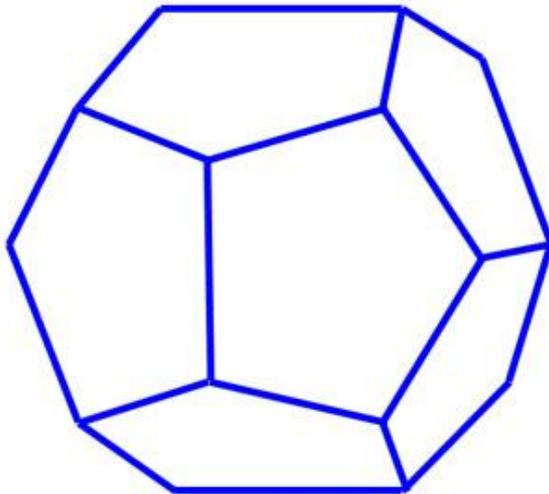
Cube



Cubo-octaèdre



Octaèdre



Dodécaèdre

**Quatre des formes cristallines
du système cubique
les plus fréquentes pour
la pyrite (FeS_2)**

Et un même système cristallin peut donner de très nombreuses formes cristallines. Voici l'exemple de la pyrite.

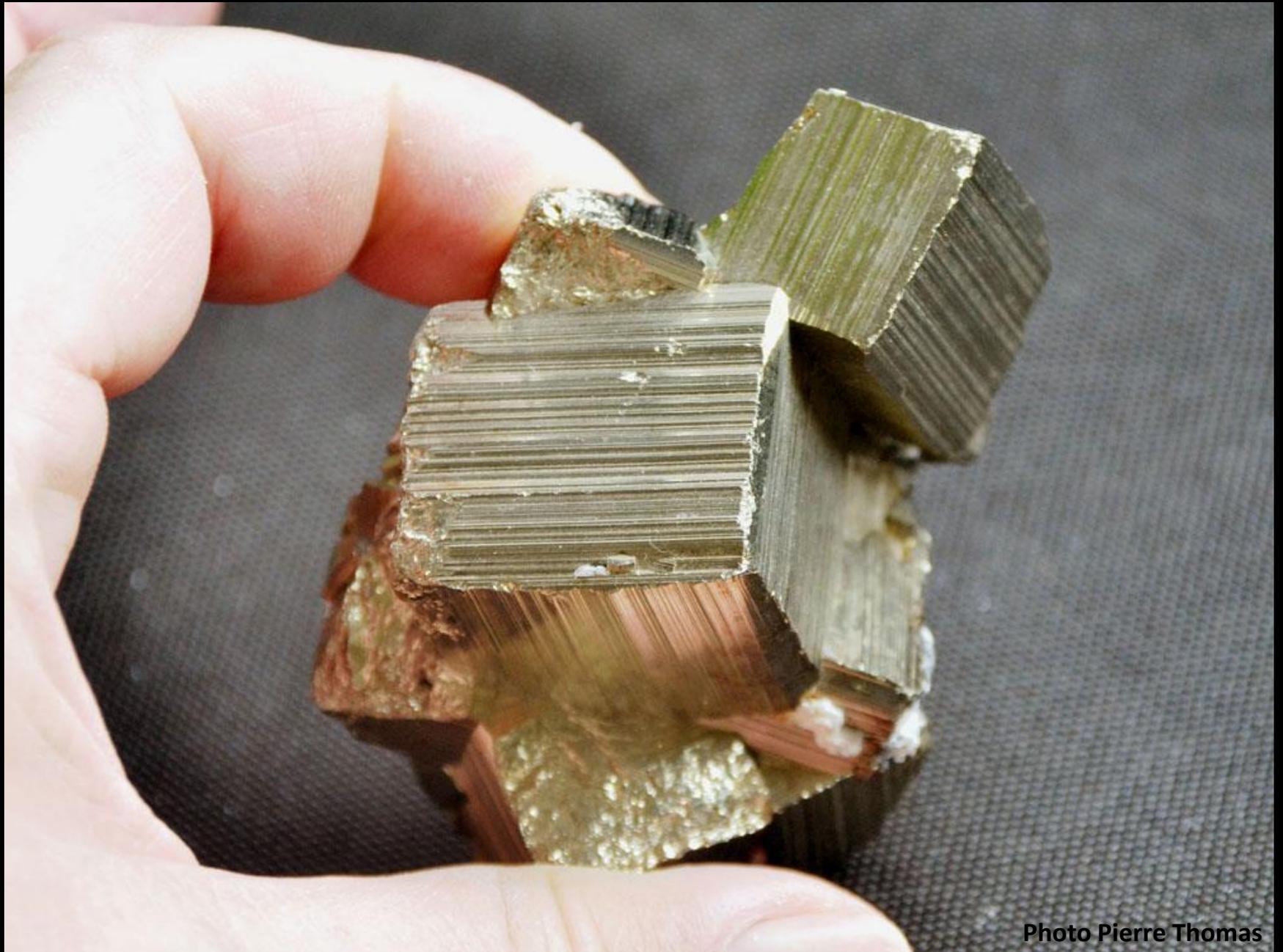


Photo Pierre Thomas

Voici de la pyrite en cube ...



Photo Pierre Thomas

en cubo-octaèdre ...



Photo Pierre Thomas

en octaèdre ...



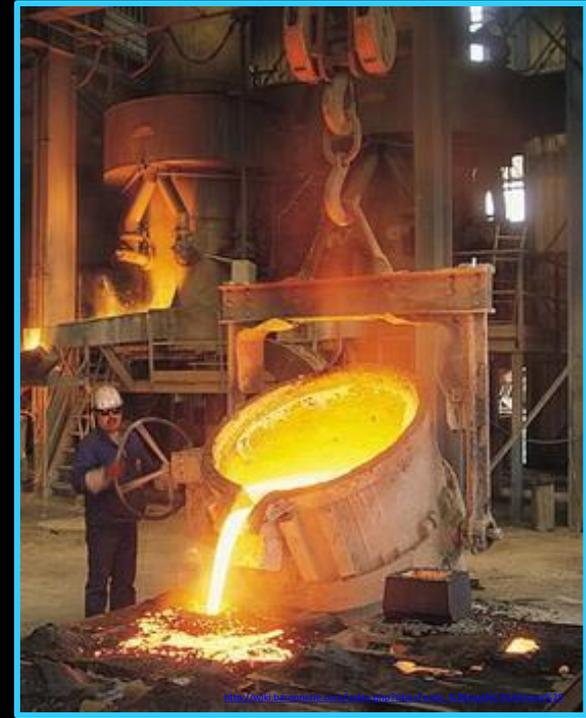
Photo Pierre Thomas

en dodécaèdre ...

Comment fait-on des cristaux ?

Voici deux des trois solutions les plus fréquentes dans la nature :

1 – On fait « geler » un liquide (ou condenser un gaz) en le refroidissant





Photographie : Philippe Mairine

Exemple d'une coulée de lave à la Réunion ...



Photographie : Pierre Thomas

... qui, en refroidissant, donne du basalte ...



http://www.brgm.fr/sites/default/brgm/Reunions_Rkipedago/images_livret_roche.htm

... qui contient des cristaux d'olivine ($\text{Mg}_{1,8}\text{Fe}_{0,2}\text{SiO}_4$)

**Quand de l'eau gèle, ça fait
des cristaux de glace, comme
ici sur la Saône à Lyon en
février 2012**



Photo Pierre Thomas



Photo Pierre Thomas



Photographie : Pierre Thomas

Les cristaux de glace, comme ceux de pyrite, peuvent avoir différentes morphologies, qui dépendent des conditions locales. Ici dans la vase d'une flaque d'eau ...



<http://goodmorninggloucester.wordpress.com/2014/01/17/len-burgess-and-his-ice-crystals/>

... là sur le toit d'une voiture ...



<http://www.geo.fr/fonds-d-ecran/nature/cristaux-epineux/80792>

... là sur un fil de fer barbelé un petit matin d'hiver



<http://www.markcassino.com/b2evolution/index.php/cat32/?paged=4>



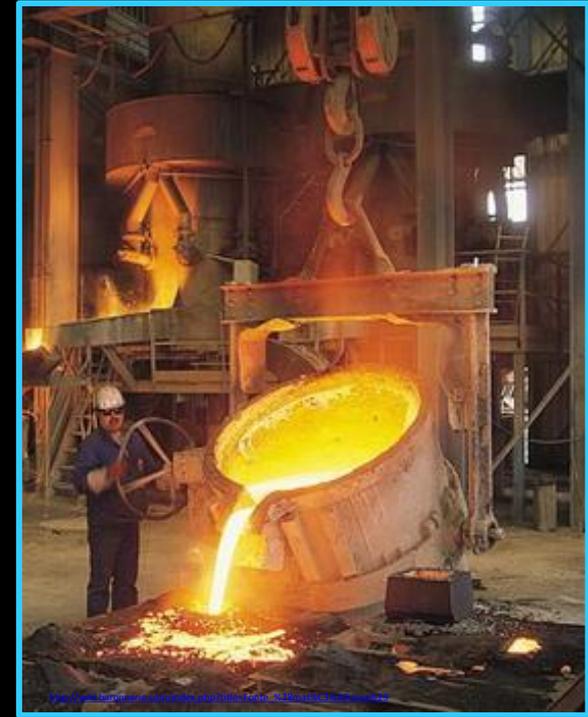
<http://www.photomacrography.net/forum/viewtopic.php?t=12256>

... la haut quelque part dans les nuages ...

Comment fait-on des cristaux ?

Voici les deux des trois solutions les plus fréquentes dans la nature :

1 – On fait « geler » le un liquide ou condenser un gaz en refroidissant



2 – On fait précipiter une solution (en général aqueuse) en faisant varier les conditions externes : concentration par évaporation, variation de température, changement de la teneur en oxygène ...





<http://recetteschinoises.blogspot.fr/2008/05/sucre-candi-chinois-hinatang.html>

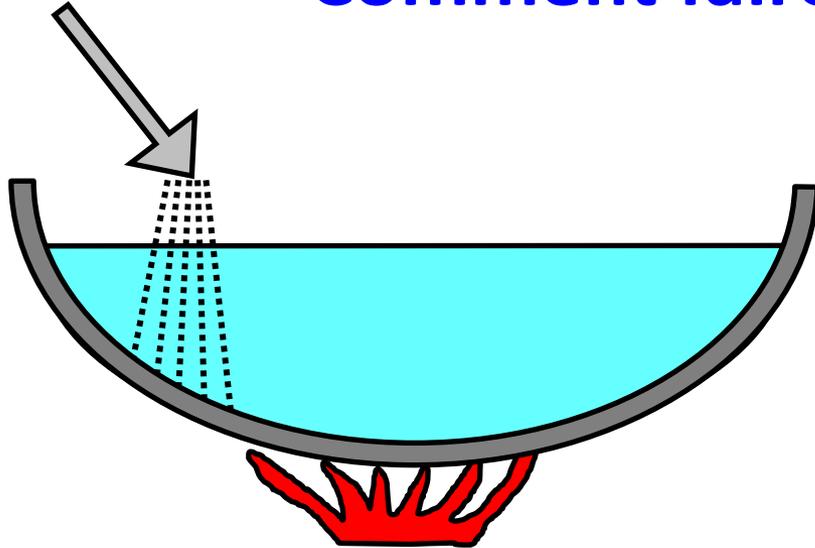
**Un exemple (non naturel)
bien connu : le sucre candi.**



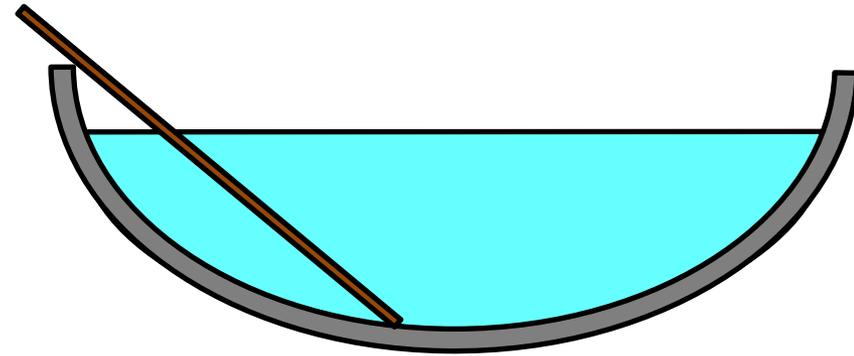
<http://la-main-a-la-pate.fr/sucettesfaconsucrecandirockcandies/>

Sucre

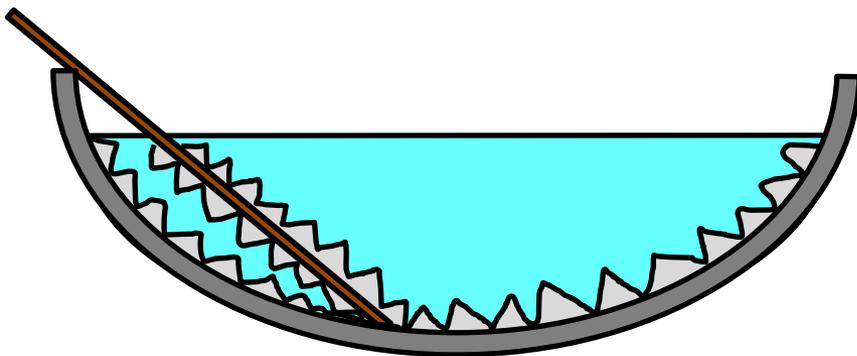
Comment faire du sucre candi ?



1 - On dissout le maximum possible de sucre dans de l'eau bouillante



2 - On plonge un bâton et on laisse refroidir longtemps



3 - Des cristaux de sucre candi se forment sur les parois et le bâton

Le sucre, beaucoup plus soluble dans l'eau chaude que dans l'eau froide, cristallise si on refroidit une solution d'eau bouillante saturée en sucre
→ cristaux de sucre candi



Photographie : Pierre Thomas

Les filons et les géodes à cristaux : du « sucre candi géologique ». Approchons nous (carrière dans le Languedoc).



Approchons nous de ce
filon de barytine
(BaSO_4).

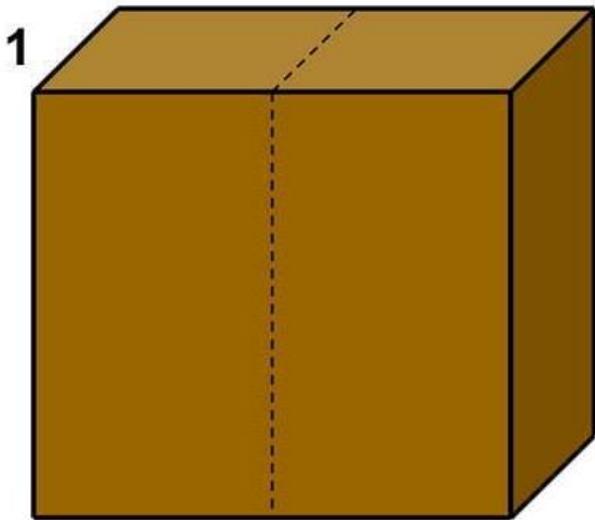


Photographie : Pierre Thomas

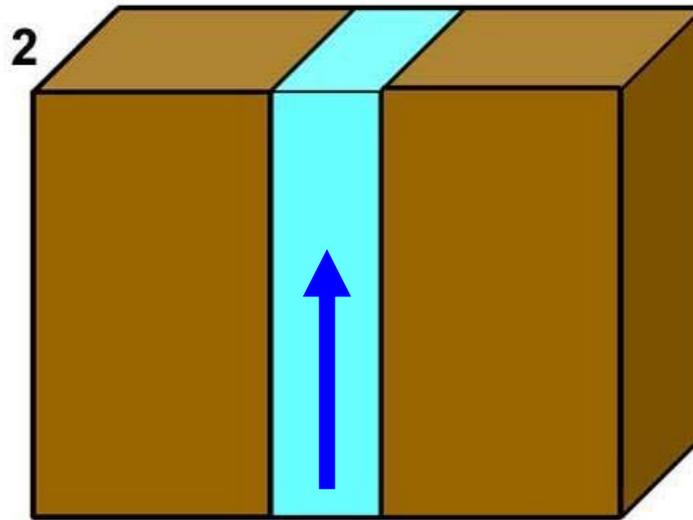
**Approchons nous encore et regardons en détail le
« trou » central ...**



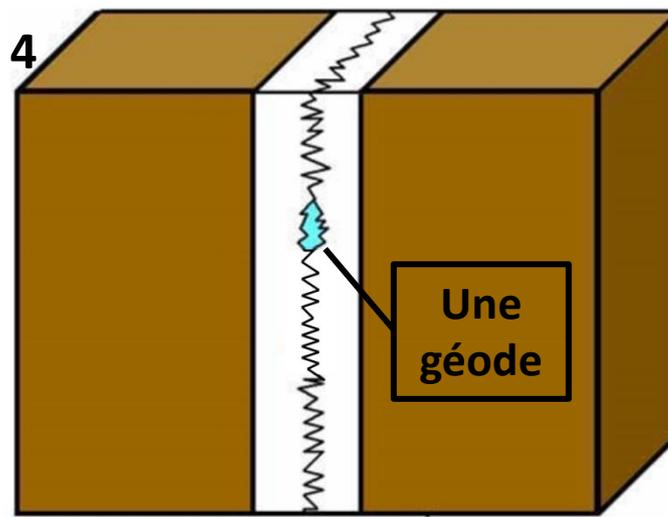
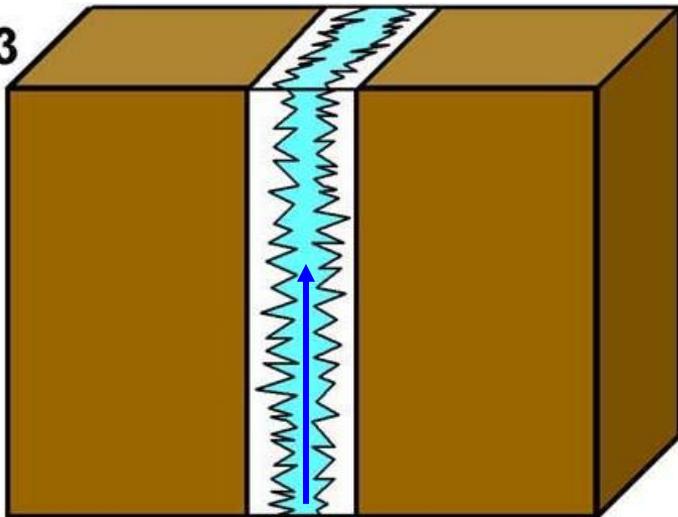
... « trou » central tapissé de cristaux (ici en forme de pétale de fleur) et appelé « géode ».



Roche avec fracture



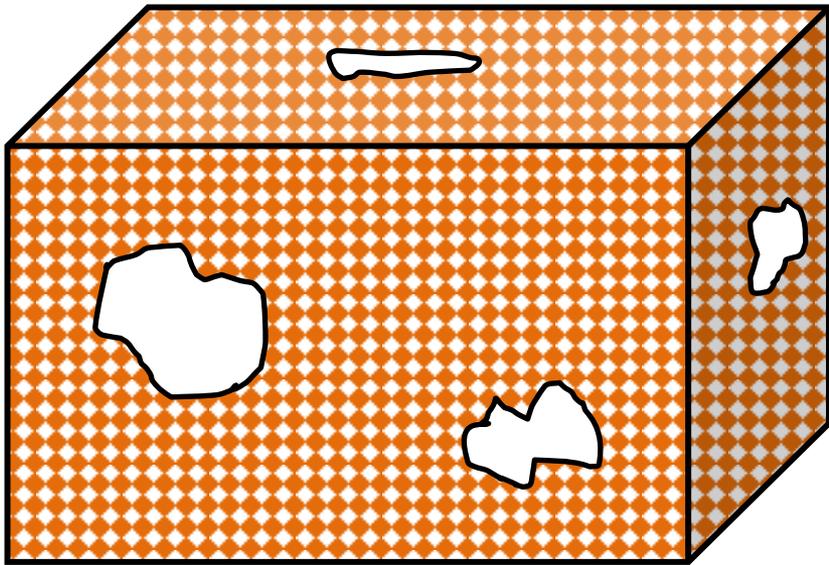
Ouverture de la fissure et remontée d'eau chaude profonde riche en composés dissouts



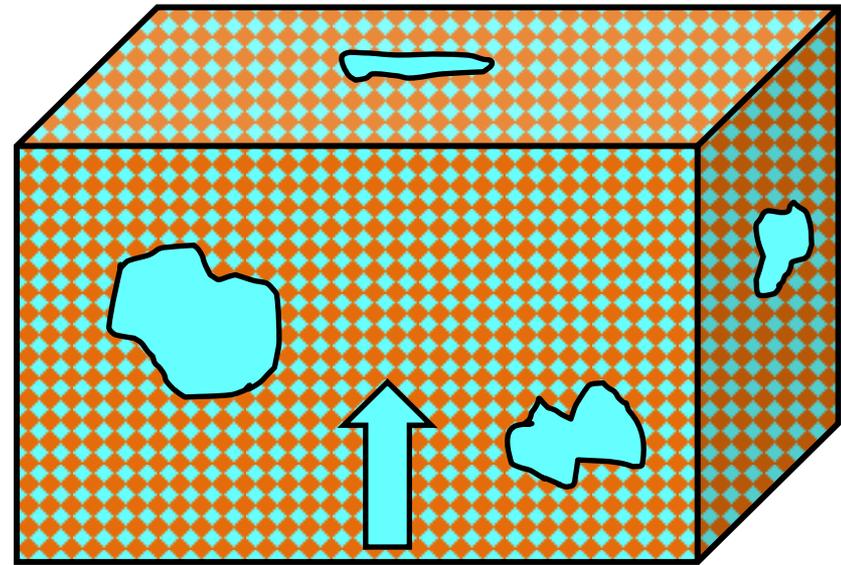
Une
géode

Dépôt de ces composés sur les parois de la fissure si l'eau se refroidit en montant et que la solubilité diminue → filon avec, éventuellement, des géodes.

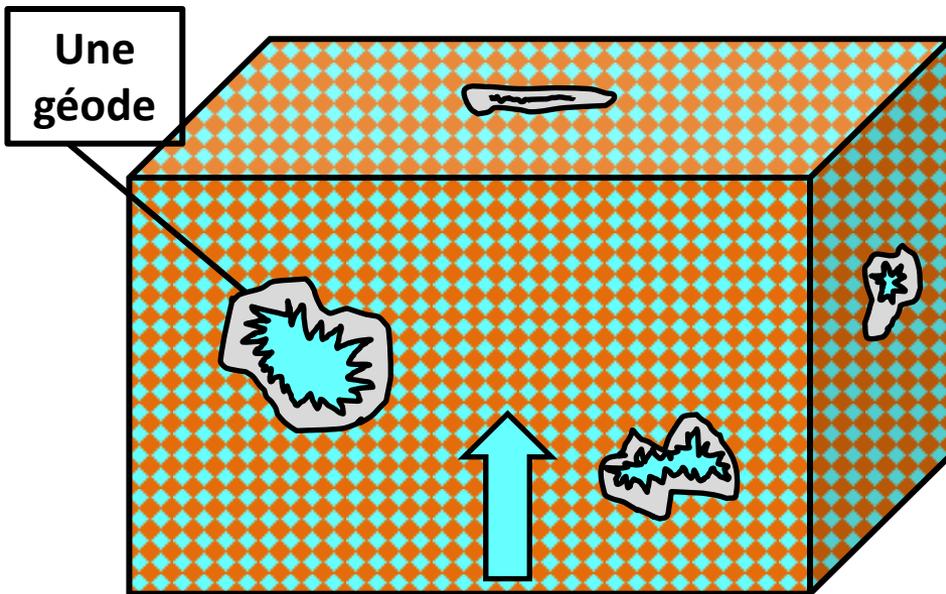
Origine de cette structure, un filon avec géode.



Roche perméable avec des cavités



Remontée d'eau chaude riche en composés dissouts

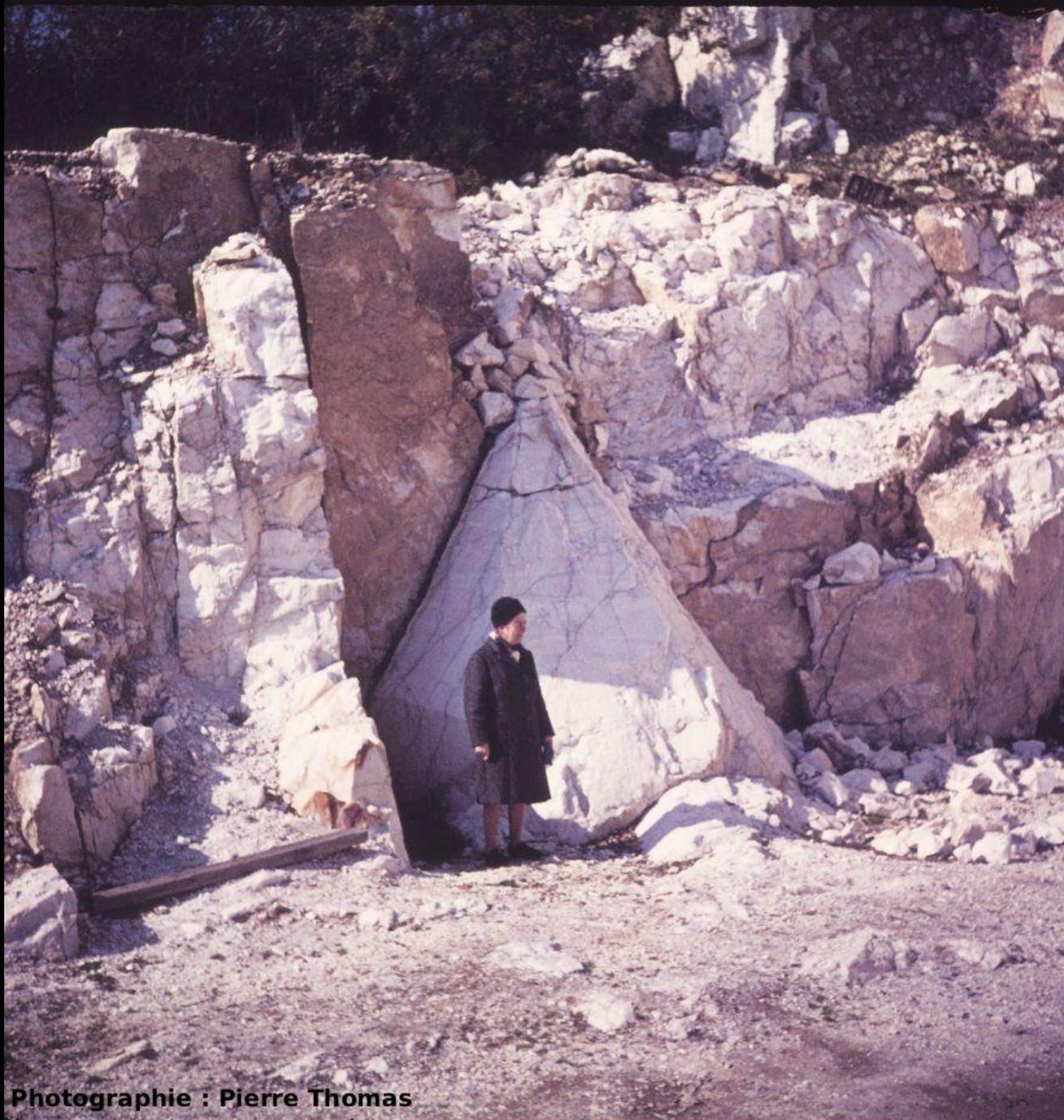


Dépôt de ces composés sur les parois des cavités

Une autre façon assez voisine de faire des géodes, par circulation d'eau dans une roche perméable et variation des conditions de cette eau (baisse de la température par exemple).



Ici une géode d'améthyste [quartz (SiO_2) coloré par des traces d'oxyde de fer et de manganèse], $\varnothing = 30$ cm



Photographie : Pierre Thomas

Les cristaux nés de cette façon sont en général « petits ». Mais ils peuvent être énormes, comme en témoigne ce cristal de quartz (SiO_2) dans une carrière du Limousin. Ma grand-mère donne l'échelle.



Photographie : Pierre Thomas

Les cristaux nés de cette façon sont en général « petits ». Mais ils peuvent être énormes, comme en témoigne ce cristal de quartz (SiO_2) dans une carrière du Limousin. Ma grand-mère donne l'échelle.

Avec Giovanni Badino, nous allons maintenant visiter la Mine de Naica au Mexique, qui donne accès à des quasi « giga-géodes », avec les cristaux les plus grands du monde. Ma grand-mère est battue à plate couture !

