



Article [www.geminterest.com](http://www.geminterest.com) :  
Site Internet dédié à la gemmologie et à l'étude des pierres.

## La nano- à micro-structure des opales gemmes naturelles: Relation avec les conditions de formation et de croissance

Présentation/Article de E. Fritsch<sup>\*1</sup>, M. Ostroumov<sup>2</sup>, B. Rondeau<sup>3</sup>, B. Aguilar-Reyes<sup>1</sup>, A. Barreau<sup>1</sup>, D. Albertini<sup>1</sup>, E. Gaillou<sup>1</sup> et J. Wery<sup>1</sup>.

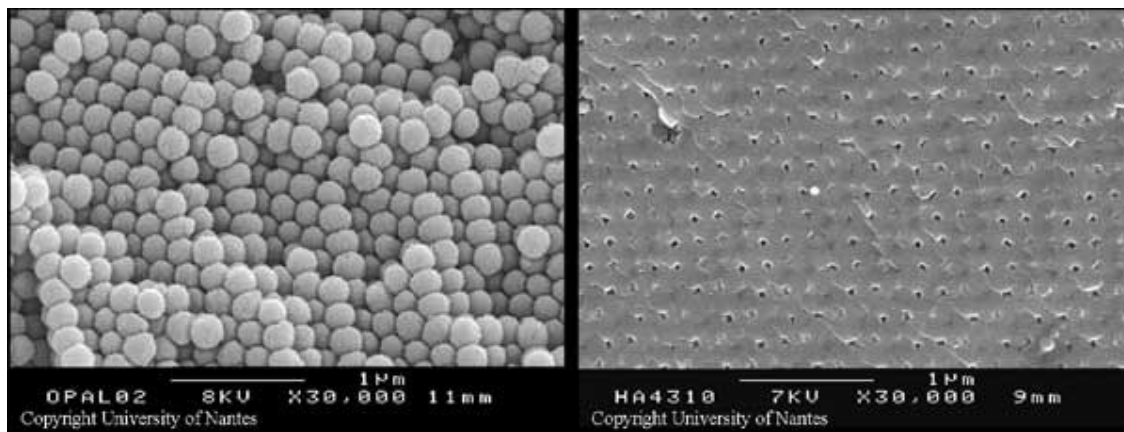
Traduction, arrangements par J.-M. Arlabosse et T. Biadatti.

Photos : Alain Cossard, David Albertini, Bernard Lasnier, Emmanuel Fritsch, Bertha Aguilar, Bertrand Devouard, François Mazzero

La plupart des opales étudiées jusqu'ici sont:

Opales d'intérêt géologique (radiolarite, etc.)

Opale A (amorphes en diffraction des rayons X [ang. XRD: X-ray Diffraction] suivant la classification de Jones et Segnit (1971) ) gemme australienne « sédimentaire » la plupart du temps avec jeux de couleur (diffraction de la lumière visible).



Cette étude se focalise principalement sur des opales gemmes les moins étudiées.



-Majoritairement du type CT (Cristobalite-Tridymite correspondant à de l'alpha-cristobalite désordonnée en XRD et microscopie électronique à transmission [ang. TEM: Transmission Electron Microscopy])

-La plupart trouvées dans un environnement volcanique

-La plupart sont des opales communes (pas de jeux de couleur)

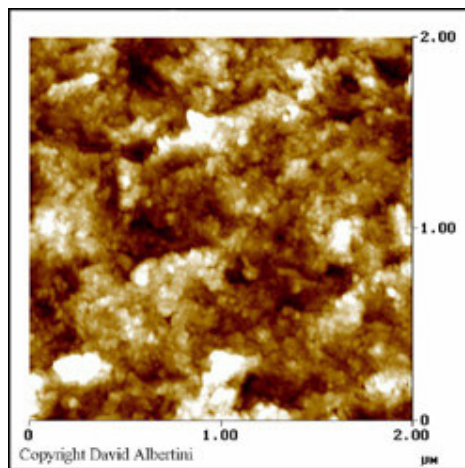
La nano- à micro-structure des opales gemmes naturelles: Relation avec les conditions de formation et de croissance

La brique élémentaire observée en utilisant les techniques de microscope à force atomique (ang. AFM: Atomic Force Microscope) et microscopie à balayage électronique (ang. SEM: Scanning Electron Microscopy) est un nanograin élémentaire de 20 à 40 nm de dimension.

Dans l'opale de feu, ces grains ne montrent aucun ordre ou arrangement particulier



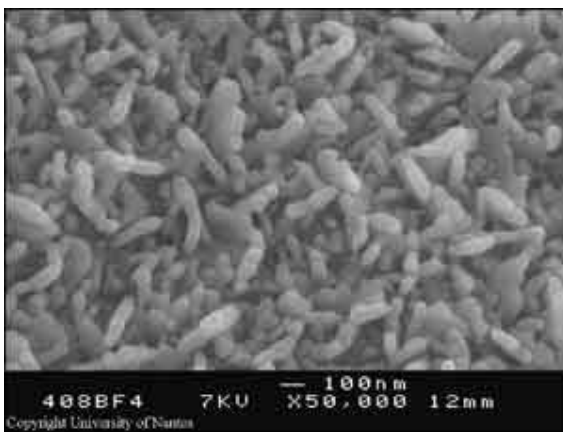
Image AFM d'une cassure fraîche d'opale de feu => Pas d'ordre



Vu dans les opales du Mexique, d'Ethiopie, du Kazakstan, du Brésil

Arrangement des nanograins suivant une dimension: Bâtonnets et fibres.

- Les nanograins peuvent s'associer pour former des bâtonnets ressemblant à des bacilles



Partie blanche d'une opale de feu, Cerro Viejo, Queretaro, Mexico

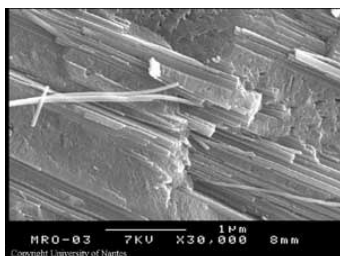
Opales roses fibreuses :

Opale rose de Mapimi, Mexique



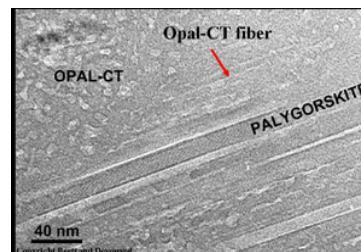
- Parfois plus de 40% de fibres de palygorskite (un silicate en feuillet plus connu sous le nom de "cuir des montagnes" ) d'environ 20 nm de diamètre.

- Les nanograins s'alignent sur les fibres de palygorskite pour former des fibres d'opale



Les fibres de Palygorskite (environ 30%) sont de 20 nm de diamètre.

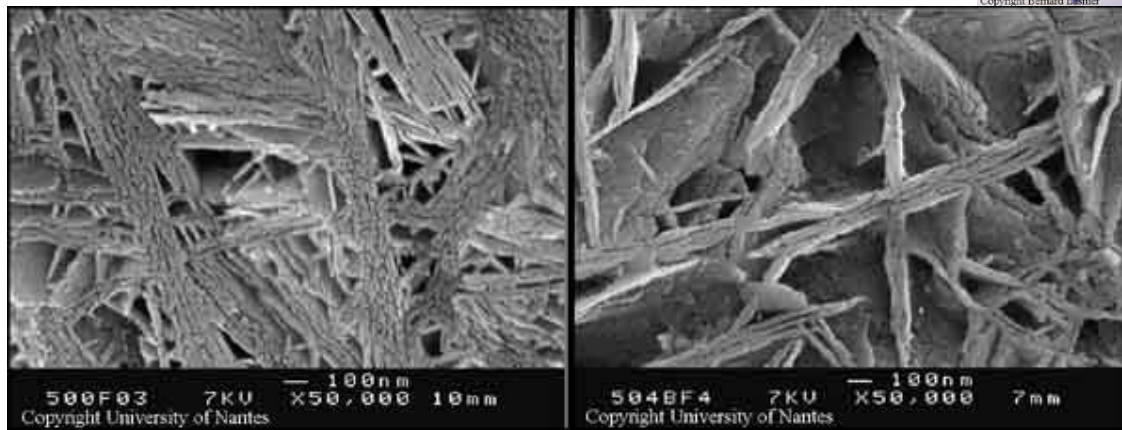
Nanograins d'opale CT groupés en fibres contre les lattes de palygorskite.



La nano- à micro-structure des opales gemmes naturelles: Relation avec les conditions de formation et de croissance

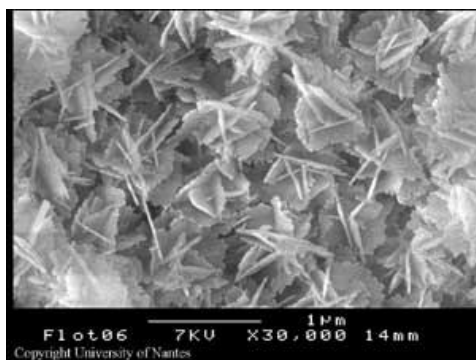
### Organisation à deux dimensions.

- Nanograins d'environ 20 nm formant des cristaux tabulaires d'alpha-cristobalite



### Organisation des nanograins suivant deux puis trois dimensions: LEPISPHERES.

- Ces cristaux tabulaires sont associés de manière à former une distribution qui est globalement sphérique: une lépispère
- Ces lépispères peuvent avoir des diamètres différents et supérieurs à plusieurs micromètres



*Opale blanche Mexicaine  
extrêmement hygroscopique  
(Queretaro).*

La nano- à micro-structure des opales gemmes naturelles: Relation avec les conditions de formation et de croissance

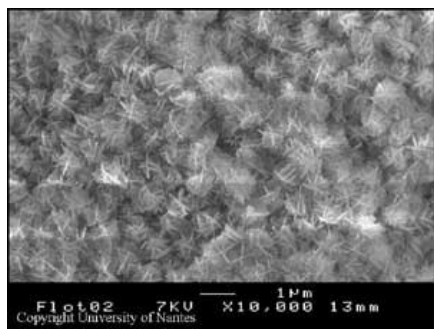
### Organisation des lépisphères tridimensionnelle ou non.

#### DESORDONNEE

Les lépisphères sont généralement toutes de la même dimension.

- Opale commune

- La couleur est blanche crayeuse



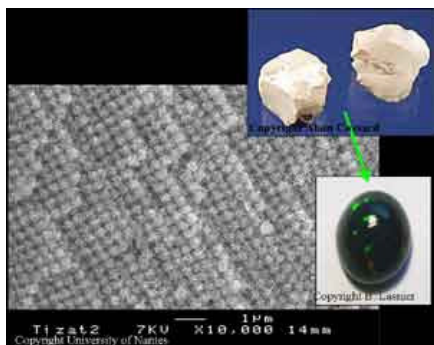
Lépisphères d'environ 1 micron de diamètre aléatoirement organisées. Opale commune blanche crayeuse (Queretaro, Mexique).

#### ORDONNEE

Réseau tridimensionnel de lépisphères monodisperses (une seule taille de lépisphères) d'environ 200 nm :

- Diffracte la lumière:  
jeux de couleur pour joaillerie

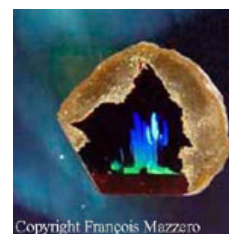
- Blanc crayeux  
(peut être traitée pour devenir noire)



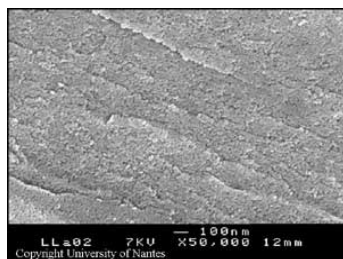
Réseau organisé de lépisphères d'environ 250 nm. jeux de couleur d'une opale blanche crayeuse (« Tizates », « Os, (ang. bone) » ou « cendre (ang. cinder) » Jalisco, Mexique) pouvant être traitée pour devenir noire.

#### Opale à jeux de couleur transparente.

Organisation tridimensionnelle invisible sur une cassure fraîche, structure révélée seulement par une attaque par de l'acide fluorhydrique (HF). Réseau de trous dans une matrice faite de nanograins d'environ 20 nm

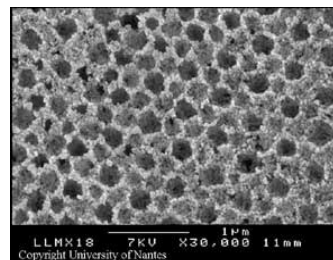


Opale à jeux de couleur, Jalisco



<Cassure fraîche

Après attaque HF>

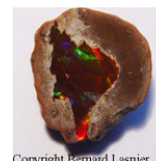


La nano- à micro-structure des opales gemmes naturelles: Relation avec les conditions de formation et de croissance

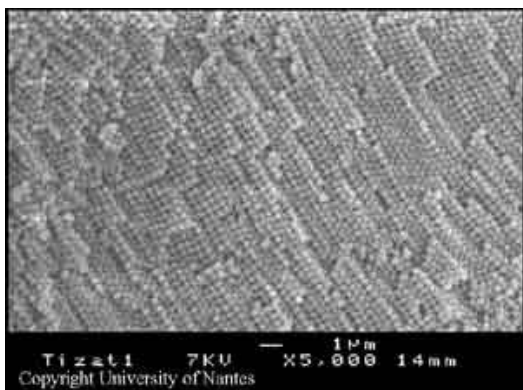
Deux catégories d'opales CT avec jeux de couleur.



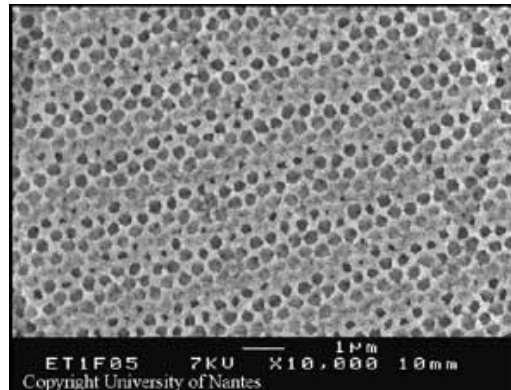
Un type de silice  
Forte diffusion de la lumière -> Blanc



Deux types de silice avec des solubilités et  
des indices de réfraction différents  
Pas de diffusion de la lumière -> transparent



*Lépisphères visibles sur une cassure fraîche*



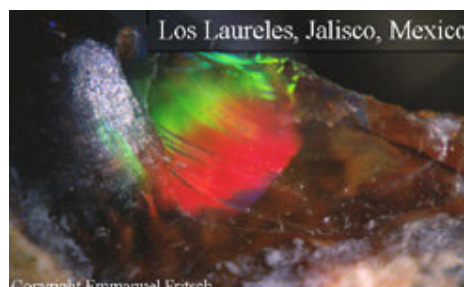
*Structure visible seulement après une  
attaque HF, lépisphères à priori dissoutes*

Il y a toute une gamme de situations intermédiaires entre ces deux extrêmes

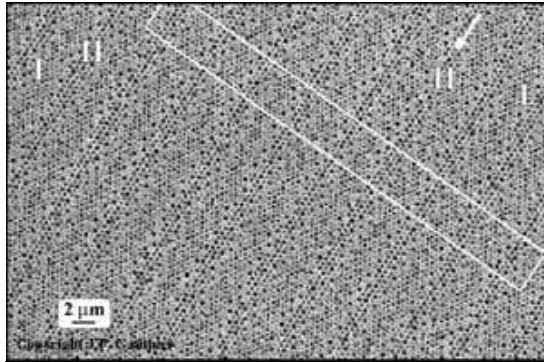
**Première description d'opale CT bidisperse (deux tailles de lépisphères).**

Collaboration avec J.-P. Gauthier, Université de Lyon, France.

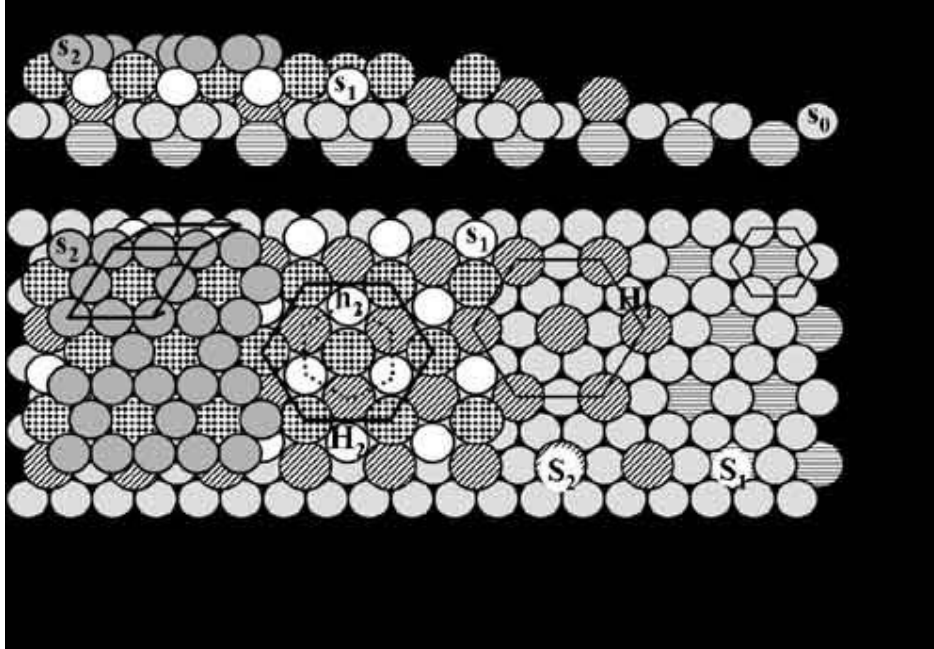
Deux dimensions de lépisphères



La nano- à micro-structure des opales gemmes naturelles: Relation avec les conditions de formation et de croissance



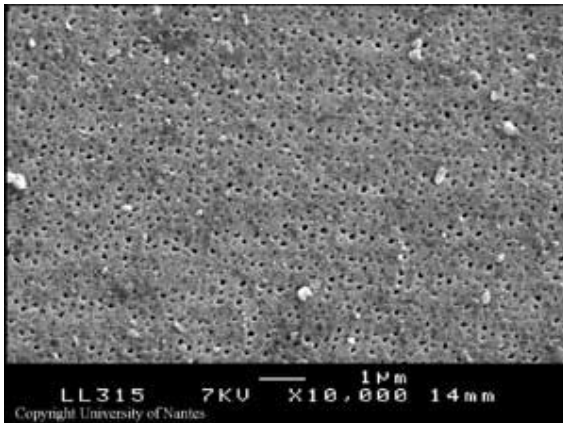
Modèle structural dans le rectangle blanc:  
Une taille de lépisphères suivant I, une autre  
taille suivant II.



Rapport  $R/r$   
des deux  
diamètres:  
1.346  
Structure  
hexagonale  
type 2H, ABAB  
analogue a une  
phase de Laves  
comme  $MgZn_2$

Influence de la qualité de l'empilement des lépisphères sur le jeux de couleurs.

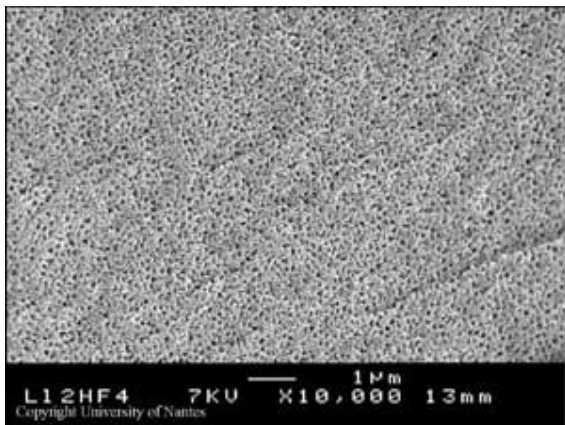
Seuls des cas quasi parfaits ont été vus jusqu'ici, une organisation de mauvaise qualité donne des jeux de couleurs faibles et "étalés"



Los Laureles, Jalisco



La nano- à micro-structure des opales gemmes naturelles: Relation avec les conditions de formation et de croissance

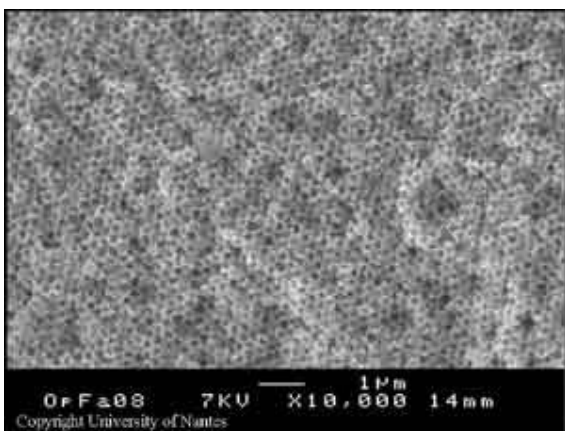


*“Opale bleue” La Carbonera, Queretaro*

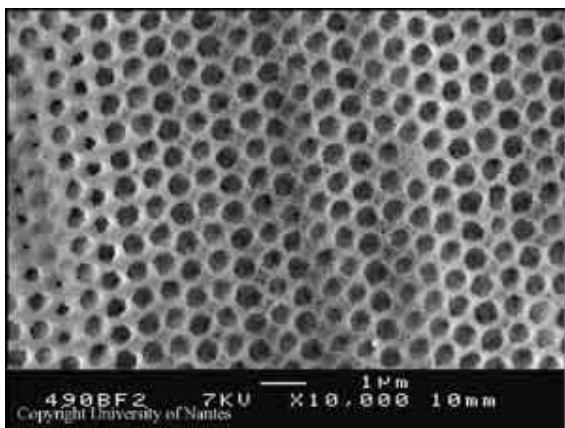


Cas peu courants (rarement documentés) ordre tridimensionnel sans diffraction.

- Les lépisphères doivent avoir le même indice de réfraction que celui de la matrice, alors qu’elles sont plus solubles
- Les lépisphères sont trop grosses pour diffracter en dépit de l’arrangement tridimensionnel Les indices de réfraction peuvent ou non être différents



*Une opale de feu normale révèle un jeu de couleur après une attaque HF*



La nano- à micro-structure des opales gemmes naturelles: Relation avec les conditions de formation et de croissance

### Conclusion sur la structure.

Il existe beaucoup de variations de la structure de l'opale, toutes fondées sur différents arrangements de nanograins ou de lépisphères. Dans certains cas, pour expliquer les observations, il y a au moins deux types de silice.

### Relation entre la structure et le mode de formation.

Est ce que les opales CT gemmes se forment dans un environnement volcanique et les opales A gemmes dans un environnement sédimentaire ?

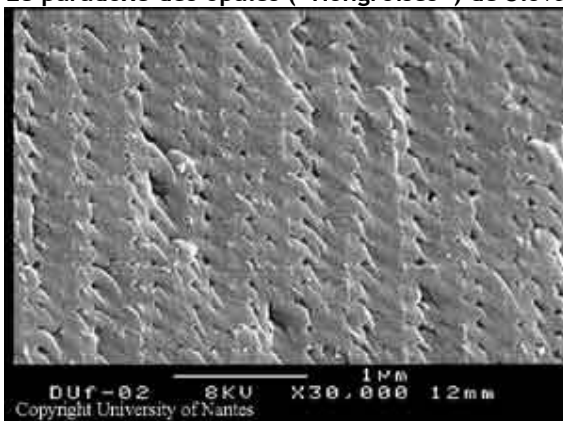
Valable et fonctionne bien pour:

->Dépôts volcaniques classiques comme au Mexique, en Ethiopie, au Honduras, au Kazakhstan, les dépôts volcaniques moins connus du Brésil (MG) et d'Australie (Tintenbar) où les opales CT sont trouvées.

->Dépôts sédimentaires classiques comme ceux du sud et du centre de l'Australie et du Brésil (Etat du Piaui) où les opales A sont trouvées

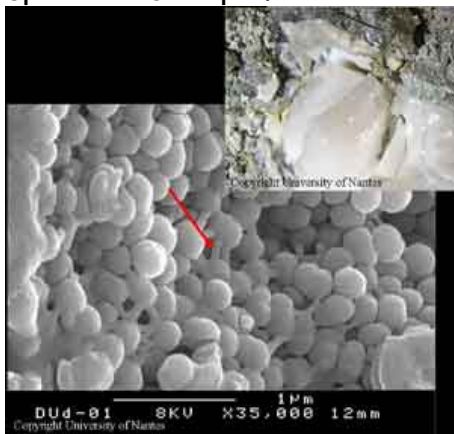
Qu'est ce qui contrôle la formation d'opales A plutôt que d'opales CT ?

### Le paradoxe des opales ("Hongroises") de Slovaquie.



*Opales A dans un environnement volcanique (andesite venant du complexe volcanique en couches de Zlata Bana)*

### Opales A de Slovaquie.



*Effet inhabituel et unique de capillarité entre les sphères*



La nano- à micro-structure des opales gemmes naturelles: Relation avec les conditions de formation et de croissance

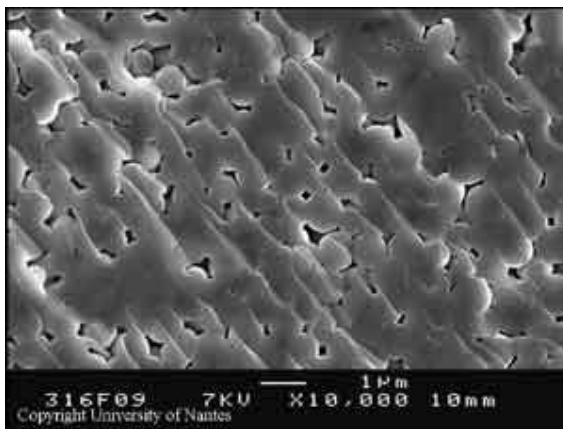
**Autres exemples.**

L'archétype du dépôt d'opales CT de renommée mondiale pour l'opale de feu

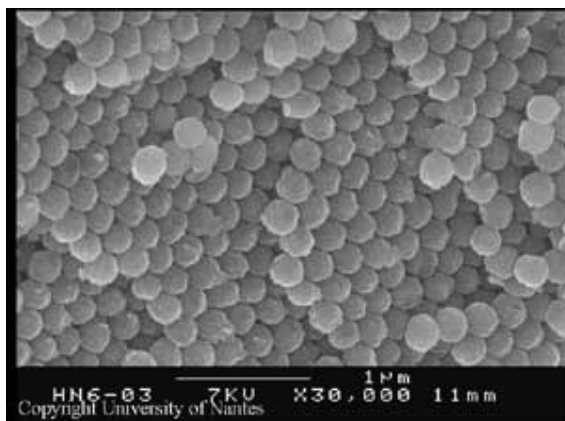


*Opale de feu CT typique.*

Ainsi, il y a apparemment des opales A secondaires dans de grandes cavités de tuf rhyolithique.



**Opale A du Honduras:**



*jeux de couleur dans une matrice blanche*



## Paramètres de contrôle

### 1) Lieu de formation

**-Tectonique pour certains échantillons d'opale A gemme**

Formation liée à des épisodes tectoniques en Slovaquie et non à une phase éruptive.

De même, contrôle lié à des failles tectoniques en Australie.

**-Vésicules ou espace libre pour les opales CT gemmes**

**NOTE:** Les modes de formation des opales A et des opales CT ne peuvent pas être si différents: les deux produisent des opales gemmes bidisperses avec les mêmes paramètres

**2) Résultats (très) préliminaires des estimations de T en utilisant le delta <sup>18</sup>O** (abondance naturelle de l'isotope stable rare de l'oxygène de poids 18, dans les différentes opales).

Echantillon	Rendement (μmol of O <sub>2</sub> /mg)	delta 18O SMOW (‰) *	Température (°C)
Slovaquie OP547	16,5	31,5	26,6
Slovaquie OP282	16,9	29,3	39,5
Slovaquie 86.2OP	16,5	31,5	26,6
Slovaquie 86.Hy	16,7	31,4	27,2
Australie OPAust	15,9	32,3	22,2
Mexique 203.21	16,5	13,0	186,9
Standard Quartz	16,8	10,1	229,4

Opale A: basse T environ 30°C; Opale CT: "Haute" T environ 170°C

SMOW: Standard Medium Oceanic Water. C'est l'eau "normale". Indirectement, et avec pas mal d'hypothèses, le pourcentage d'oxygène 18 permet de remonter à la température de formation des opales (article sous presse dans European Journal of Mineralogy)

## Conclusions

- La structure de l'opale CT gemme peut être décrite en utilisant différents degrés d'organisation des nanograins de silice d'environ 20 nm de dimension
  - Plus de quatre degrés d'organisations pour les opales CT à jeux de couleur
  - Il ne s'agit pas d'un processus de cristallisation
  - Il peut y avoir plus d'un type de silice dans les opales CT
  
  - L'environnement géologique n'est pas directement pertinent
  - Le paramètre majeur contrôlant le type d'opale gemme formée est la température.
    - >Opale A basse T 30° C
    - >Opale CT « HT » 170° C
- EF

- 1) LPC & CMC, IMN, Nantes FR
- 2) Dept. de Geologia y Mineralogia, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, Morelia, MX
- 3) Dept. Histoire de la Terre, Museum National d'Histoire Naturelle (MNHN), Paris, FR