

# L'Opale Bleue du Pérou

Formation et exploitation : enquête



Frédérique Bello Cortes

N° Etudiant 817240

Projet de diplôme FGA - 2020

Laboratoire de Gemmologie de Marseille

2020 - GemDipPR12 - Formation et exploitation de l'opale : enquête

## 1. Résumé

29 échantillons d'opale commune bleue du gisement d'Acari au Pérou ont été étudiés. Ces opales sont bleu turquoise intense à bleu très pâle et ne présentent pas d'effet de « jeux de couleurs ».

Il s'agit d'opale où le ratio de cristobalite et tridymite (C/T) est variable avec un petit pourcentage de calcédoine pour certaines. Le ratio C/T est plus élevé dans l'opale commune de couleur bleue que dans les opales d'autres couleurs présentes au Pérou.

La géologie locale indique que les opales bleues d'Acari sont associées avec des phénomènes de volcanisme et de minéralisation locale dans une zone connue comme un dépôt « Iron Oxyde Copper Gold ». Le gisement est exploité artisanalement.

Les propriétés internes de ces pierres ont été observées à la loupe et au microscope. Les indices de réfraction et la densité mesurés sont dans le champ de l'opale commune à l'exception de quelques pièces de qualité commerciale et fortement incluses. La fluorescence a été étudiée pour tous les échantillons avec des résultats variables en fonction de la qualité et des inclusions.

La littérature existante indique que la cause de la couleur de cette pierre est le  $\text{Cu}^{2+}$ .

Des tests faits avec les méthodes avancées de laboratoire n'ont pas pu être réalisés pour cette étude.

Finalement une réflexion a été menée à la fois sur la taille et sur la classification de l'opale bleue de qualité gemme.

## 2. Introduction

Dans les années 70 on a découvert quelques gisements d'opale commune d'une couleur bleu turquoise intense appelée Opale des Andes ou Opale bleue. On la trouve au Pérou<sup>1</sup> principalement sous sa forme commerciale.

La comparaison entre la littérature sur les propriétés des opales communes vertes ou bleu-vertes et les tests effectués ici permettent de mettre en avant des propriétés gemmologiques correspondant au à l'opale commune de type CT.

L'exploitation de cette pierre se fait de façon artisanale. De même la commercialisation est très atomisée et comme peu de pièces de qualité gemmes sont disponibles sur le marché il n'existe pas de gradation des différentes qualités de cette gemme.

Une étude géologique complète permettrait d'appréhender le potentiel commercial des gisements existants et l'intérêt économique de cette gemme dont la source principale est au Pérou (l'opale de Biot en France a à peu près la même couleur mais la mine n'est plus exploitée).



Photo n°1 : Premier échantillons d'opale bleue d'Acari obtenus en voyage en Février 2019

### 3. Accès à la zone

Les gisements d'opales bleues analysées ici sont situés dans le sud du Pérou à une douzaine de kilomètres au Nord-Est d'Acari dans le Département d'Aréquipa sur une montagne qui se trouve à l'ouest de la route n°102 dans une zone d'environ 12km<sup>2</sup>, entre 1300m et 1700m d'altitude. Cette zone est proche du désert de Nazca connu pour ses géoglyphes. Région aride et totalement désertique (voir photo n°1), on accède à Acari par la route sans problème. La zone minière n'est cependant accessible qu'en 4x4 par des pistes parfois très chaotiques.



Photo n°2 : Zone désertique où se trouvent les mines d'opale bleue (Fev. 2019)

### 4. Géologie régionale, géologie locale et formation

Le Pérou est situé entre la plaque tectonique de Nazca et celle d'Amérique du Sud. Le pays est divisé en trois zones distinctes très marquées : la côte (Costa), la « cordillère » (Sierra) et la « jungle » (Selva). Le département d'Aréquipa est situé entre la côte et la cordillère des Andes et la ville Acari juste à la frontière entre les deux<sup>2</sup>.



Fig.1 Les 3 zones géographiques du Pérou

L'opale bleue se trouve dans des zones minéralisées d'environ 30 cm où les veines pures font entre 1 et 5 cm maximum. Les échantillons d'opale ont été récupérés de la région des mines de cuivre d'Acari, localisée à peu près à 600 km de Lima. Les mines se situent entre 1300m et 1700m d'altitude.

C'est la « ceinture d'or » de Nazca-Ocaña où la tectonique des plaques de Nazca et de l'Amérique du Sud a généré la minéralisation de la zone, les Andes et son magmatisme<sup>3</sup>. Les mines d'Acari exploitent probablement un corps de minerais du cuivre en intrusion du porphyre tertiaire qui est la continuité de la plus grande ceinture de cuivre au monde située dans le nord du Chili<sup>4</sup>.

Cette mine est située dans une zone de roches volcano-sédimentaires (intrusion de granodiorite, diorite et tonalite) de l'époque du Mésozoïque et Cénozoïque qui font partie de grand batolite de « Botalito de Costa ». Sur la base d'une carte géologique, la minéralisation de l'opale est située dans les zones de granodiorite altéré qui forme des breccias et dans les zones de tufs altérés mais la localisation exacte des échantillons n'est pas précisée<sup>5</sup>.

La minéralisation des secondaires de cuivre couvre une région très large dans cette zone. Les exploitations sont orientées Nord-Ouest/Sud-Est et casi parallèlement à la cordillère des Andes.



Fig. 2 : Image satellite de l'orientation NO/SE et parallèle à la Cordillère des Andes des mines proches d'Acari - Google Earth (consulté en 03/2020)

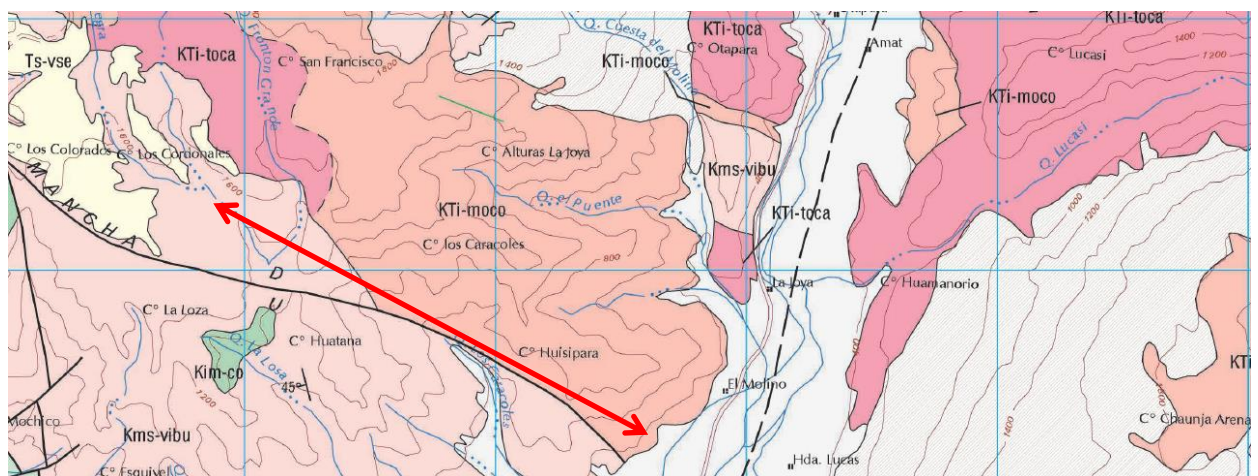


Fig. 3 : Zone géologique des mines d'Opale Bleue d'Acari<sup>6</sup>

## Formation

L'opale CT se trouvera toujours dans un environnement volcanique<sup>7</sup>, la présence de cristobalite et tridymite est caractéristique de cette catégorie<sup>8</sup>.

Certains auteurs pensent que l' «*On peut faire l'hypothèse que [...] la minéralisation de l'opale vient de fluides riches and silice émanant de roches volcaniques qui ont ensuite migré au travers de fissures et fractures.*»<sup>9</sup> alors que d'autres indiquent que «*L'opale se forme dans des dépôts sédimentaires ou volcaniques et viendrait de l'érosion de roches siliceuses (rhyolite ou grès) suivi de précipitations de liquides enrichis en SiO<sub>2</sub> dans des cavités.*»<sup>10</sup>.

Les tests ICP-MS qu'ils ont réalisés ont permis de confirmer que la teneur en Ba est caractéristique pour déterminer l'environnement de formation, si Ba > 110ppm il s'agit d'opales d'origine sédimentaire alors que si la teneur en Ba est < 110ppm les opales sont d'origine volcanique comme les opales bleues d'Acari<sup>11</sup>.

## 5. Histoire, opérations minières, production

### Histoire

La zone est exploitée pour ses ressources minières depuis au moins les années 70. On y exploite industriellement l'or et le cuivre. L'opale bleue a été trouvée pour la première fois au début de 1970 conjointement à la chrysocolle<sup>12</sup>.

Dans la zone il existe plusieurs projets miniers de grande importance comme Pampa de Pongo ou Romerillo qui exploitent les dépôts de type IOGC contenant principalement du Fer, de l'Or et du cuivre<sup>13</sup>.

### Types d'Exploitations Minières

On distingue 2 types d'exploitation minière dans la région :

1. Les exploitations artisanales de 1 et 5 personnes exploitées manuellement avec des explosifs (dynamite), des masses et des burins pour creuser les tunnels allant jusqu'à 90m. de profondeur. Elles sont repérables par image satellite à cause des déchets vert/gris laissés à l'entrée et qui contrastent avec la couleur rouge/ocre du sol de la région. (Voir Fig. 4)



Fig. 4 Image satellite de mines artisanales où sont exploités le cuivre, la chrysocolle et l'opale, source Google Earth.

2. L'exploitation industrielle du cuivre dont les mines sont parfaitement visibles sur les images satellite - exploitation mécanisées (voir Fig.5)



Fig. 5 Image satellite de la mine industrielle de cuivre proche d'Acari provenant de Google Earth

### Production

Trois gisements ont été documentés au Pérou : Lily Mines près d'Ica, les Mines d'Acari dans la région d'Aréquipa<sup>14</sup> et vers 2010 une zone proche d'Huaytara dans le département de Huancavelica<sup>15</sup>. Il est très difficile d'évaluer la capacité de production en opale bleue de la région car aucune étude formelle et complète n'a été documentée.

Les articles déjà publiés mentionnent que la mine Lily produisait 10 tonnes d'opales tous les 2-3 mois mais seulement 1 ou 2 kilos de qualité gemmes<sup>16</sup> alors que la production de la zone d'Acari serait de 200-400kg/mois sur 6 mois et moins de 10% est bleue de transparente à "laiteuse" translucide<sup>17</sup>.

Les veines sont souvent fines à très fines, de 5cm à 0,5cm<sup>18</sup> (photo n°3). Il existe de plus grosses veines mais celles-ci sont généralement très incluses et comportent une grande partie blanche, les rendant inadaptées pour tailler des pierres de qualité gemmes.



Photo n° 3 : Déchets d'opale bleue avec roche mère trouvés devant la mine d'opale - voyage Fév. 2019



Photo n° 4 : Déchets vert/bleu trouvés devant la mine d'opale - voyage Fév. 2019

## 6. Composition

L'opale est composée de silice et d'eau :  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , la proportion d'eau peut aller de 3% à 20%. Afin d'expliquer les différentes propriétés des opales et leur origine géologique plusieurs auteurs ont analysés les inclusions, impuretés et éléments traces.

Du fait de leur proximité et de leur environnement de formation volcanique, l'analyse des opales roses et bleues-vertes d'Acari se fait ensemble. Les résultats présentés par Fritsch<sup>19</sup>, Brajkovick<sup>20</sup>, Caucia<sup>21</sup> font état de sépiolite et palygorskite comme éléments importants dans la composition de ces opales. On observe que la palygorskite n'est présente qu'en cas de pierres incluses (inclusions brunes et dendrites) et la quantité de sépiolite est inférieure à 15% mais beaucoup plus présente dans les opales roses.

Les éléments traces sont principalement du Cu et du Mg (les proportions diffèrent selon les échantillons)<sup>22</sup>. En particulier l'impact du Mg car la quantité de Mg et Zn dans les opales bleues est beaucoup plus importante que dans les opales vertes et roses<sup>23</sup>.

## 7. Causes de la couleur

Des micro-inclusions minérales disséminées dans la pierre en particulier de cuivre divalent en environnement octaédrique ( $\text{Cu}^{2+}$ )<sup>24</sup> sont à l'origine de la couleur des opales bleues-vertes. Ce résultat est validé dans l'ensemble de la littérature. L'analyse par la spectrométrie Raman à transformée Fourier a permis de préciser que la composition de l'inclusion était proche de la chrysocolle<sup>25</sup>.

Gaillou et. al.<sup>26</sup> confirment que la couleur est due à des inclusions de silicates de cuivre mais ne précise pas de quelle nature. Il pourrait s'agir de :

- Chrysocolle pure (sans Al) (pas de réaction aux UV)
- Planchéite (pas de réaction aux UV)
- Bisbeeite, qui serait l'hypothèse préférée car il s'agit d'une variété de Shattuckite riche en Mg.



## 8. Matériaux et méthodes

Les matériaux utilisés ici ont été obtenus en partie lors d'un voyage au Pérou en 2019 et en partie via un mineur (Luis) de la région d'Ica mais qui travaille dans la zone d'Acari. Sur une quantité d'environ 3 kilos de brut, 29 morceaux ont été choisis et soit gardés bruts soit taillés en cabochons ou facettés. La liste détaillée est disponible en Annexe 1 et les photos des échantillons sont disponibles ci-après.








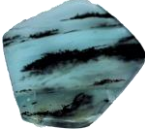



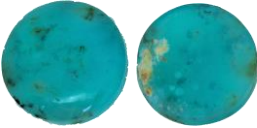

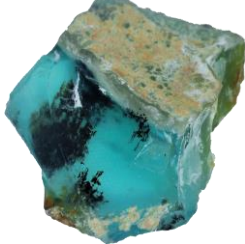












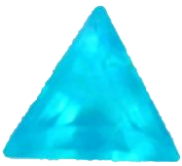


La stratégie de sélection des échantillons a été définie en fonction des différentes qualités identifiées (voir paragraphe 11) afin d'établir s'il y a une corrélation entre les propriétés gemmologiques de l'opale et sa qualité.

Les échantillons ont été testés pour leur densité avec une balance hydrostatique Mettler-Toledo Modèle JB1203-C et de l'eau déminéralisée. Pour les UV courts et longs (254/365nm) une chambre UV Upland Model CC-10 a été utilisée.

L'indice de réfraction a été mesuré avec un réfractomètre sans marque et une liqueur dense d'indice entre 1,78 et 1,79, pour les mesures la technique approximative du point a été utilisée pour les cabochons et pierres polies et la technique classique pour les pierres facettées.

Les inclusions ont été observées au microscope gemmologique Euromex (x6,5 – x55) et photographiées en avec un boîtier Olympus OM-D-EM 5 Mark II (x2).

**Tableau des échantillons**

Qualité	1	2	3	4
Commerciale (Com)				
Dendritique (Den)				
Contaminées (Cont)				
Brut				
A				
AA				
AAA				
EXTRA				

Les images ne sont pas à taille réelle et ne sont pas proportionnelles entre elles.

## 9. Résultats

Les résultats sont cohérents avec la littérature existante (Fritsch, Rondeau, Caucia, Gaillou.....)

La densité se situe généralement entre 2,03 et 2,1 sauf pour trois échantillons dont la densité est légèrement supérieure à 2,1 (Com\_3, Com\_4 et Den\_1) très certainement à cause des inclusions. Deux des échantillons, de qualité commerciale ont une fluorescence blanc-bleu crayeux comme la calcédoine dont la densité avoisine les 2,6 ce qui pourrait expliquer les résultats. L'échantillon Den\_1 est inclus à la base avec des inclusions de roches mère ce qui pourrait expliquer la densité légèrement > 2,1.

L'indice de réfraction se situe entre 1,44 et 1,45 sauf à certains endroits où on trouve des inclusions blanches où l'I.R. peut monter jusqu'à 1,50 se rapprochant ainsi de celui de la calcédoine (environ 1,54).

Les résultats de l'exposition aux U.V. laissent supposer que d'autres minéraux sont présents dans certaines pierres en fonction de leur aspect et qualité. La qualité « Extra » est totalement inerte mais les qualités allant de AAA à A peuvent présenter une fluorescence blanc-bleu crayeux plus ou moins forte, ce qui pourrait faire penser à une phase de « calcédoine »<sup>27</sup>. La fluorescence verte apparaît principalement sur les pierres où l'on retrouve de la roche « mère », ce qui est commun avec de la cristobalite.

S'il n'est pas possible, suite aux différents tests effectués, d'indiquer précisément la nature des minéraux à l'origine de la fluorescence, nous pouvons tout de même constater que les pierres de meilleure qualité sont totalement inertes aux U.V.

### Inclusions typiques (voir Cadre C)


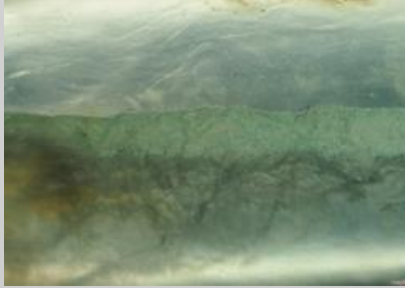

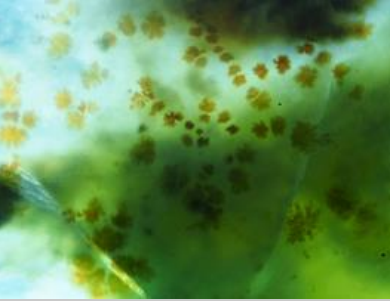


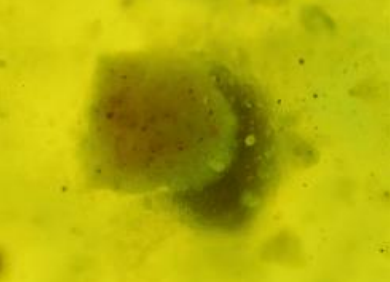
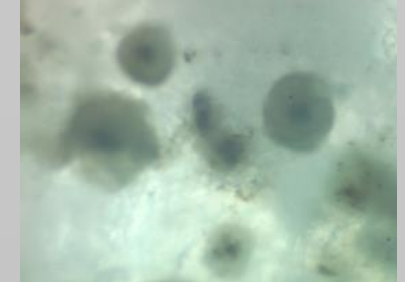
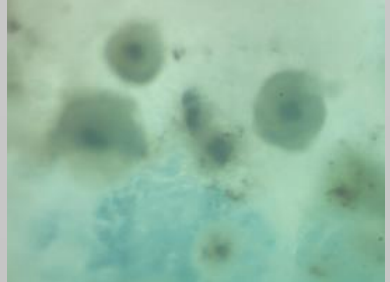



La nature même des inclusions reste à confirmer car il existe très peu de littérature spécifique aux inclusions dans les opales bleues, sauf pour les dendrites qui seraient des oxydes de Fer ou des oxydes de manganèse<sup>28</sup>.

D'après plusieurs auteurs (Fritsch, Caucia, Brajkovic...), les inclusions bleues sont un silicate de cuivre, peut-être de la chrysocolle car on en trouve dans la roche-mère autour de l'opale.

Les inclusions rondes avec un « noyau » ressemblent à certaines images de cristobalite<sup>29</sup>, les inclusions de calcédoine documentées ressemblent à celles photographiées ici sur les échantillons « AAA ».

Pour plus de précision, une analyse avec un spectromètre Raman et sa sonde serait nécessaire.

## INCLUSIONS TYPIQUES DANS LES OPALES BLEUES

		
<p>Echantillon : Com_4 x10 - Transmis fond sombre Zones de couleur et dendrites</p>	<p>Echantillon : A_4_ x10 - Transmis fond sombre Limite 2 types d'inclusion : « gel » et « voiles blanc »</p>	<p>Echantillon : Com_1 x15 - Transmis fond sombre + Direct Inclusions blanches et bleues</p>
		
<p>Echantillon : Cont_1 x35- Transmis fond sombre «Petites feuilles » type dendrites (Oxyde de Manganèse et/ou Fer – A confirmer)</p>	<p>Echantillon : AA_1 x10-Transmis fond sombre + Direct Tâche noire et dendrites (Oxyde de Manganèse et/ou Fer – A confirmer)</p>	<p>Echantillon : Cont_2 x55 – Transmis fond sombre Inclusions rondes noires (Oxyde de Manganèse et/ou Fer– A confirmer)</p>
		
<p>Echantillon : Com_3 x50 -Transmis fond clair 2 petites inclusions minérales</p>	<p>Echantillon : Cont_4 x20 - Transmis fond clair Inclusions rondes avec noyau (Cristobalite – A confirmer)</p>	<p>Echantillon : Cont_4 x20 - Transmis fond sombre Inclusions rondes avec noyau (Cristobalite – A confirmer)</p>
		
<p>Echantillon AAA_1 x55- Transmis fond sombre Inclusion blanche (Calcédoine – A confirmer)</p>	<p>Echantillon : AAA_3 x45- Transmis fond clair Inclusion blanche (Calcédoine – A confirmer)</p>	<p>Echantillon : AAA_3 x45- Transmis fond sombre Inclusion blanche (Calcédoine – A confirmer)</p>

## 10. Taille

L'opale bleue du Pérou est appréciée pour sa couleur turquoise ressemblant à celle de la tourmaline Paraiba.

Pour maintenir la saturation des pierres presque transparentes il est nécessaire de garder au moins 3,5mm de long ou diamètre, en deçà la pierre perd sa couleur. Dans le cas où elle est plus « laiteuse/opaque » la saturation en couleur se maintient malgré une taille petite.

La principale difficulté est d'arriver à renforcer la brillance de cette gemme dont l'I.R. est bas.



Photo n°5 : Taille trillion facetté



Photo n°6 : Taille trillion swiffé (facettée et couronne en cabochon)

## 11. Proposition de classification et d'évaluation de l'opale

L'opale noble, noire, blanche ou de feu, fait déjà l'objet d'une classification et d'une évaluation formalisées soit via le Gemguide<sup>30</sup> de Gemworld soit via les plaques Opal Reference Master Set (voir photo n°7) produites par la société australienne Cody Opal.

Pour les opales communes il n'existe pas de guide d'évaluation formelle car la commercialisation de cette pierre en qualité gemme reste rare et L'Opal Reference Master ne recense que 3 qualités d'opale bleue : la AA, la A et la B.

Cette étude a comme objectif de proposer une gradation développée sur la base de la méthodologie développée par Gemworld International Inc.



Photo n°7: Tray n°9 – Opal Reference Master Set – Cody Opal – Serie n° 52/57

## TENTATIVE DE CLASSIFICATION DE L'OPALE BLEUE

Basé sur les travaux déjà réalisés de l'Opal Reference Master de Cody Opal et le World of Color de Gemworld International Inc.<sup>31</sup> plusieurs dizaines d'opales bleues facettées et en cabochon (dont tous les échantillons) ont été analysées sous lumière naturelle (orientation plein nord) et comparées à l'échelle de couleur de World of Color afin de définir une gradation.

Le Gemguide de Gemworld International Inc. est le pendant tarifaire de World of Color. Une grille de notation sur 10 est appliquée pour définir les prix des pierres de couleur. Ce même système de notation a été repris ici et une correspondance appliquée pour simplifier la gradation.

Certaines couleurs ont dû être extrapolées car non existantes dans World of Color.

GEMGUIDE GRADATION			GRADATION FOR FGA PROJECT
COMMERCIAL	1	VERY LOW	COMMERCIAL
	2	LOWER	
	3	MIDDLE	
	4	UPPER	
GOOD	5	LOWER	A
	6	UPPER	AA
FINE	7	LOWER	
	8	UPPER	
EXTRA FINE	9	LOWER	AAA
	10	UPPER	EXTRA

La qualité commerciale n'a pas été représentée ici car offrant peu d'intérêt pour ce projet.

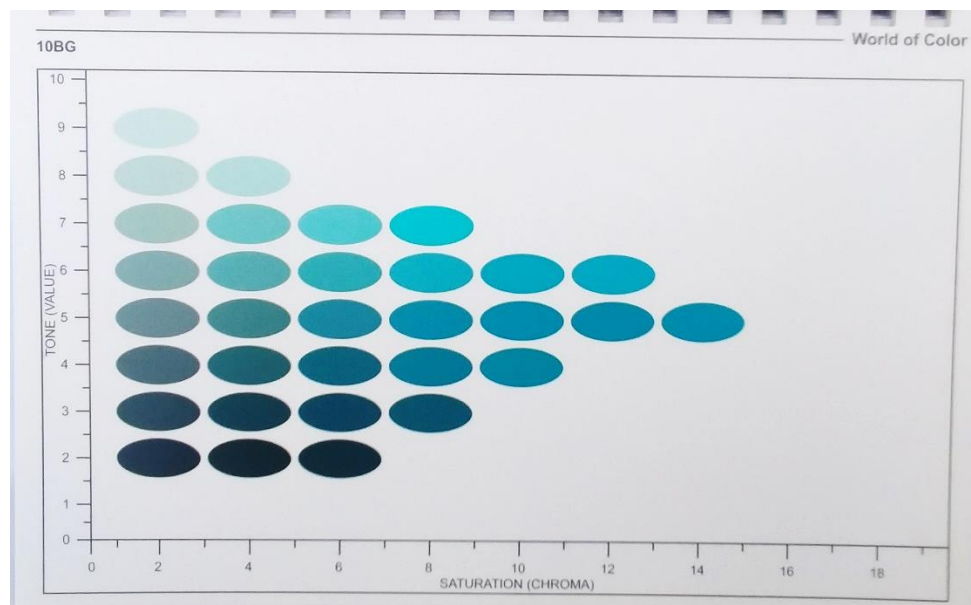


Photo n°8 : Exemple de page de gradation 10BG (Bleu-Vert) de la couleur dans World of Color de Gemworld

## TABLEAUX DE GRADATION DEVELOPPE SUR LA BASE DE WORLD OF COLOR

Cette proposition de gradation s'inspire du Guide World of Color de Gemworld International Inc. mais a été développée spécifiquement pour cette étude par l'auteure.

10 YG									
9		4							
8	5	4.5							
7									
6									
5									
4									
3									
2									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18

2.5 BG									
9	5								
8	5		6	6					
7		5.5	6	6					
6	4	4			7				
5									
4									
3									
2									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18

5 BG									
9									
8	5	6							
7		6	6	7.5					
6	3		7.5	8	8	9			
5		3	4			9			
4		3							
3									
2									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18





7.5 BG									
9									
8	5								
7			7	8	9				
6					9.5	9.5			
5						9.5	9.5		
4									
3									
2									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18

10 BG									
9									
8				8					
7			8	10	10				
6				9.5	9.5	9.5			
5									
4									
3									
2									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18




Correspond à la couleur la plus appréciée de l'opale bleue



## GRADATION - QUALITE GEMME - EXEMPLES

			
<p><b>A (10GY9/4)</b> = Bleu/Vert très pâle nuancé de jaune, presque incolore et/ou effet "laiteux", translucide. Inclusions jaunes et vertes visibles à l'oeil.</p>	<p><b>AA (5BG 7/6)</b> = Bleu pâle moins prononcé/Effet "laiteux", translucide. Inclusions blanches et jaunâtres visibles à l'oeil</p>	<p><b>AAA (10BG 8/8)</b> = Bleu/ Bleu vert intense et transparent à translucide, petites inclusions visibles à l'oeil</p>	<p><b>EXTRA (10BG 7/8) =</b> Bleu "turquoise/paraïba" intense, translucide à transparent, inclusions à peine visibles à l'oeil</p>

## GRADATION - QUALITE DENDRIQUE

		
<p><b>A</b> = Opale translucide à transparente, bleu tirant sur le vert</p>	<p><b>AA</b> = Opale translucide à transparente, bleu plus pâle</p>	<p><b>AAA</b> = Opale translucide à transparente, très saturée en bleu</p>

Il s'agit ici d'une première ébauche qui devra être retravaillée et complétée pour être totalement alignée avec les guides de référence de Gemworld. Ce premier travail facilite une première évaluation objective de la valeur des opales bleues sur la base de la couleur.

## 12. Discussion, Conclusion

L'opale bleue, avec sa couleur bleu turquoise rappelle la tourmaline Paraïba et représente un intérêt gemmologique non négligeable.

A ce jour il reste beaucoup d'incertitudes concernant cette pierre : capacités de production, structure, stabilité, identification précise des inclusions minérales à l'origine de sa couleur, conditions de formations etc.

Un prochain voyage d'étude sur site devrait permettre de récolter des échantillons de roche mère permettant de mieux définir l'environnement de formation et si possible, les capacités potentielles de production de cette pierre en qualité gemme.

L'accès à une quantité importante d'échantillons devrait permettre de clarifier les points susmentionnés à condition d'avoir accès aux équipements de laboratoire avancés.

Cette gemme pourrait avoir un potentiel économique intéressant à condition que sa beauté et rareté soient reconnues et valorisées sur le marché des pierres de couleur.



Photo n°9 de gauche : Entrées de mines artisanales dans la région d'Acari.



Photos n° 10 & n°11 : Brut d'opale bleue de diverses qualités.

**Annexe 1** - Liste des résultats des analyses réalisées sur les échantillons d'opales bleues du Pérou

Ref.	Description	Qualité	Couleurs	Transparence	Inclusions	Poids	Densité	IR	Technique lecture IR	UVC	UVL
Com_1	Pierre polie forme libre avec différentes étapes de minéralisation : moitié translucide avec dendrite autre moitié avec inclusions minérales bleue et blanches presque opaques	Commerciale	Bleu, noir	Translucide à opaque	Diverses : inclusions minérales bleues (chrysocolle?) et blanches, dendrites noires	25,748	2,065	IR1 face bleue = 1,44-1,45 IR2 inclusions bleues et blanches = entre 1,48-1,50 IR3 coté dendrite = 1,45	Point	Très légère fluo blanc-bleu crayeux	Inerte
Com_2	Cabochon ovale "strié" blanc et bleu	Commerciale	Bleu, blanc, noir	Translucide	Inclusions dendritiques aux pointes	9,563	2,080	Entre 1,43-1,45	Point	Légère bleue blanche	Prononcée blanc-bleu crayeux
Com_3	Cabochon rectangulaire (base polie)	Commerciale	Bleu-vert-gris	Translucide à opaque	Dendrites noires sur la face et roche sur le fond de culasse	20,368	2,104	1,457	Classique	Tâches verte-blanche	Inerte
Com_4	Cabochon en forme de poire "strié" (base polie)	Commerciale	Bleu, blanc, marron	Translucide à opaque	Dendrite, minéraux marrons, pointe de la poire blanche	16,771	2,117	1,463	Classique	Légère bleue blanche sur la pointe	Prononcée sur la pointe
Den_1	Cabochon rond avec nombreuses dendrites noires (base polie) et voiles blancs	Dendritique AAA	Bleu turquoise intense + noir	Translucide	Dendrites noires et voiles blancs, roche « mère » sur la base	10,152	2,108	1,448	Classique	Inerte	Inerte
Den_2	Double cabochon ovale avec dendrites au niveau des "pointes"	Dendritique AA	Bleu turquoise + noir	Translucide	Dendrites noires	6,282	2,077	1,445	Point	Inerte	Inerte
Den_3	Petit double cabochon en forme de goutte	Dendritique AA	Bleu turquoise pâle et noir	Translucide	Dendrites noires	1,494	2,064	1,45	Point	Inerte	Inerte
Den_4	Morceau taillé en forme libre	Dendritique A	Bleu très pâle et noir	Translucide à transparent	Dendrites noires en plans et inclusions minérale blanc/bleu	5,706	2,086	1,45	Point	Inerte	Inerte
Brut_1	Morceau de brut avec plusieurs couches minérales bleue, blanche, marron	Brut	Bleu, marron	Translucide à opaque	inclusions minérales marrons et bleues, dendrites	41,386	2,097	Non applicable		Légère bleue crayeux	Très légère blanc-bleu aux pointes
Brut_2	Morceau de brut avec des dendrites et une couche de roche mère	Brut	Bleu, noir	Translucide	Dendrites	17,375	2,054	Non applicable		Inerte	Inerte
Brut_3	Petit morceau avec stries d'inclusions blanches et bleues	Brut	Bleu et blanc	Translucide	Inclusions minérales bleues et blanches	9,121	2,091	Non applicable		Strie verte-blanche prononcée	Inerte

Réf.	Description	Qualité	Couleurs	Transparence	Inclusions	Poids	Densité	IR	Technique lecture IR	UVC	UVL
Cont_1	Morceau en forme libre "hache" avec dendrites et inclusions marrons	N/A	Bleu intense	Transparent	Dendrites noires et minéraux marrons	17,766	2,057	1,452	Classique	Inerte	Inerte
Cont_2	Morceau poli en forme libre	N/A	Bleu turquoise	Translucide à transparent	Voiles blancs, dendrites et inclusions marrons	43,668	2,049	1,45	Point	Corps inerte et inclusions bleu crayeux	Inerte
Cont_3	Morceau poli en forme libre "hache pointue"	N/A	Bleu turquoise clair	Translucide	Voiles blancs	27,62	2,063	1,45	Point	Tâches fluo vert-blanc très prononcée	Prononcée vert-blanc
Cont_4	Cabochon rond très inclus (base polie)	N/A	Bleu turquoise intense	Translucide	Voiles et "gouttes" blancs, inclusions marrons	11,179	2,033	1,442	Classique	Inclusion roche "mère" fluo vert	Inclusion roche "mère" fluo vert blanc
A_1	Cabochon rond	A	Bleu très pâle	Translucide	Léger voile blanc	2,255	2,030	1,45	Point	Très très légère bleu crayeux	Prononcée bleu crayeux
A_2	Cabochon haut forme libre triangulaire (base polie)	A	Bleu très pâle	Translucide	Voiles blancs et petites inclusions marrons	7,895	2,069	1,45	Classique	Légère bleu crayeux	Très légère bleu crayeux
A_3	Double cabochon en forme de poire	A	bleu turquoise	Translucide	Inclusions jaubens/marrons	2,322	2,086	1,45	Point	Inerte	Inerte
A-4	Cabochon long de forme ovale	A	Bleu turquoise pâle et noir	Translucide	Voile blanc traversant et inclusions marrons/jaune	6,744	2,059	1,45-1,455	Point	Voile blanc = fluo bleu crayeux	Voile blanc = fluo bleu crayeux très légère
AA_1	Double cabochon poire	AA	Bleu turquoise laiteux	Translucide	Dessus voile blanc traversant Dessous inclusions noires et jaune/marrons	43,339	2,060	1,44-1,45	Point	Bleu crayeux	Léger blanc bleu
AA_2	Double cabochon ovale	AA	Bleu turquoise laiteux	Translucide	Pas d'inclusions à l'œil nu	1,883	2,085	1,45	Point	Inerte	Inerte
AA_3	Pierre facettée rectangulaire mixte	AA	Bleu turquoise	Translucide à transparent	Légers voiles	4,822	2,033	1,446	Classique	Léger bleu crayeux	Très très léger blanc bleu
AA_4	Taille "artistique"	AA	Bleu turquoise	Translucide à transparent	Voiles blancs	0,581	2,039	1,456	Classique	Léger bleu crayeux	Léger blanc bleu

Réf.	Description	Qualité	Couleurs	Transparence	Inclusions	Poids	Densité	IR	Technique lecture IR	UVC	UVL
AAA_1	Poire facettée	AAA	Bleu turquoise intense	Transparent	Voiles blanc	2,625	2,077	1,452	Classique	Inerte	Très très léger bleu
AAA_2	Double cabochon ovale	AAA	Bleu turquoise intense	Translucide à transparent	Voiles blanc	1,864	2,085	1,45	Point	Inerte	Très très léger bleu
AAA_3	Double cabochon rond	AAA	Bleu turquoise intense	Transparent	Petite inclusion jaune	1,711	2,076	1,44-1,45	Point	Inerte	Inerte
EXTRA_1	Triangle à degré	EXTRA	Bleu turquoise électrique	Transparent	Voiles blancs	2,164	2,071	1,453	Classique	Inerte	Inerte
EXTRA_2	Coussin	EXTRA	Bleu turquoise électrique	Transparent	Voiles blancs	2,668	2,055	1,451	Classique	Inerte	Inerte
EXTRA_3	Double cabochon ovale allongé	EXTRA	Bleu turquoise électrique	Transparent	Voiles blancs	1,616	2,040	1,44	Point	Inerte	Inerte

## RÉFÉRENCES

- <sup>1</sup> Hyrsl, Jaroslav. « Gemstones of Peru. » *The Journal of Gemmology* 27, n°6 (2001): 328-334.
- <sup>2</sup> Koivula, J., et Kammerling, R. « More on Peruvian Opals. », *Gem News dans Gems & Gemmology* 27, (1991): 259-260.
- <sup>3</sup> Tumialan De La Cruz, P., « Yacimientos de minerales metalicos del Peru. » *Re. Inst. Investig. Fac. Minas metal cienc. Geogr* 1, (1998) dans Brajkovic, A., et. al., « Blue and pink opals from Acari, Peru: Their optical, structural and spectroscopic features. » *The Australian Gemmologist* 23, (2007), 5.
- <sup>4</sup> Brajkovic, A., et. al., « Blue and pink opals from Acari, Peru: Their optical, structural and spectroscopic features, » 5.
- <sup>5</sup> Ibid., 5-6.
- <sup>6</sup> Vidal, J. 1998. « Carte géologique A-030 d'Acari et de Yauca. » Institut de Géologie et des Mines, Secteur Energie et Mines de la République du Pérou, 31n-32-n.
- <sup>7</sup> Gaillou, E. et. al. « The Geochemistry of gem opals as evidence of their origin. » *Ore Geology Reviews* 34, (2008): 14. <https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-00323885> (consulté le 23 septembre 2019).
- <sup>8</sup> Nagase, T & Akizuki, M. « Texture and structure of opal-C in volcanic rocks. » *Can. Mineral.*, 35 (1997): 947-958 dans Fritsch, E., et. al. « Relationship between nanostructure and optical absorption in fibrous pink opals from Mexico and Peru. » *European Journal of Mineralogy* 16, (2004): 743-752.
- <sup>9</sup> Brajkovic, A., et. al. « Blue and pink opals from Acari, Peru : Their optical, structural and spectroscopic features, » 5-6.
- <sup>10</sup> Gaillou, E. et. al. « The Geochemistry of gem opals as evidence of their origin, » 5.
- <sup>11</sup> Ibid., 2.
- <sup>12</sup> Hyrsl, J. *Gemas del Peru antiguo y moderno*. (Lima : Asociacion Andrés Del Castillo, Museo Andrés Del Castillo, 2006), 66.
- <sup>13</sup> INGEMMET, Sector Energia y Minas 2018. « Atlas Catastral, Geologico, Minero y Metalurgico. Ministerio de Energia y Minas. Lima. Pérou, 92-103.
- <sup>14</sup> Quinn, E. « Peruvian Blue Opal. » *Gem News International dans Gems & Gemology* 39, (2003): 332.

- <sup>15</sup> Hyrsl, J. « Gemas del Peru antiguo y moderno, » 67.
- <sup>16</sup> Quinn, E. « Peruvian Blue Opal, » 332.
- <sup>17</sup> Koivula J., Kammerling R. « More on Peruvian opal. » *Gem News dans Gems & Gemology* 27, (1991): 259-260.
- <sup>18</sup> Hyrsl, J. « Gemstones of Peru, » 328.
- <sup>19</sup> Fritsch, E. et. al., « Relationship between nanostructure and optical absorption. » *European Journal of Mineralogy* 16 (2004): 743-752.
- <sup>20</sup> Brajkovic, A., et. al., « Blue and pink opals from Acari, Peru: Their optical, structural and spectroscopic features, » 5.
- <sup>21</sup> Caucia F. et al., «New physical, geochemical and gemmological data of opals from Acari Mine (Arequipa Department, Peru), » 73-84.
- <sup>22</sup> Ibid. 76.
- <sup>23</sup> McOrist, G.D., Smallwood, A. « Trace Elements In Coloured Opals Using Neutron Activation Analysis. » *9<sup>th</sup> Australian Conference on Nuclear Techniques of Analysis, Newcastle, Australia, (27-29/11/1995): 6-7.*
- <sup>24</sup> Rondeau, B. « Origine de la couleur et structure des opales communes. », 21.
- <sup>25</sup> Ibid. 21.
- <sup>26</sup> Gaillou, E. et. al. «The Geochemistry of gem opals as evidence of their origin, » 10.
- <sup>27</sup> W. Schumann, *Guide Delachaux : Pierres précieuses fines et ornementales*, (Paris : Delachaux et Niestlé, 2015), 142.
- <sup>28</sup> Caucia F. et al., «New physical, geochemical and gemmological data of opals from Acari Mine (Arequipa Department, Peru), » 75.
- <sup>29</sup> E. Gübelin, J. Koivula, *Photoatlas of Inclusions in Gemstones – Volume 2*, (Basel: Opinio Publishers, 2005), 318.

<sup>30</sup> Gemworld International Inc., *Gemguide Jan./Feb. 2020* (Glenview: Gemworld International Inc, 2020).

<sup>31</sup> Gemworld International Inc., *The World Of Color Communication System*, (Glenview: Gemworld International Inc, 2013), 10YG, 2.5BG, 5BG, 7.5BG, 10BG.



## **BIBLIOGRAPHIE**

- Brajkovic A. et al. « Blue and Pink Opals from Acari, Peru. Their optical, structural and spectroscopic features. » *The Australian Gemologist*, 23(1) (2007): 1-48.
- Caucia, F. et al. « New physical, geochemical and gemmological data of opals from Acari Mine (Arequipa Department, Peru). » *Journal of Mineralogy and Geochemistry* (2015): 73–84, <http://doi.org/10.1127/njma/2014/0272>
- Chen, H., Cooke, D., Baker, M. « Mesozoic Iron Oxide Copper-Gold Mineralization in the Central Andes and the Gondwana Supercontinent Breakup. » *Economic Geology* 108 (2017): 37-44.
- Cody, A. & D., *Opal Master Reference Set n°52*, Australie: Cody Opal, 2018, Tray n°9.
- Delaunay, A. « Master 2 Recherche Géosciences Planétaires : Vers une géochimie de l'Opale. » *Université de Nantes, Faculté des Sciences et Techniques, Laboratoire de Planétologie et Géodynamique*, (2005): 1-30.
- Fritsch, E. et al. « Découvertes récentes sur l'opale. » *Revue de Gemmologie* 138/139 (1999): 34-40.
- Fritsch, E. et al. « Relationship between nanostructure and optical absorption in fibrous pink opals from Mexico and Peru. » *European Journal of Mineralogy* 16 (2004): 743-752.
- Gaillou E. et al. « Common gem opal: An investigation of micro to nano structure. » *American Mineralogist* 93 (2008) : 1865-1873.
- Gaillou E. et al. « The Geochemistry of gem opals as evidence of their origin. » *Ore Geology Reviews* 34 (1-2) (2008): 113-126, <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2007.07.004> (consulté le 23 septembre 2019).
- Gemworld International Inc., *Gemguide Jan/Feb. 2020*. Glenview: Gemworld International Inc. 2020.
- Gemworld International Inc., *World of Color Communication System*. Glenview: Gemworld International Inc. 2013.
- Gemworld International Inc., 2013, *World of Color, A companion*. Glenview: Gemworld International Inc. 2013.
- Gübelin, E., Koivula, J., *Photoatlas of Inclusions in Gemstones – Volume 2*. Basel: Opinio Publishers, 2005.
- Hitzman, M.W., Oreskes, N., and Einaudi, M.T. « Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. » *Precambrian Research* (58) (1992) dans CHEN, H., Cooke, D., Baker, M. « Mesozoic Iron Oxide Copper-Gold Mineralization in the Central Andes and the Gondwana Supercontinent Breakup. » *Economic Geology* 108 (2012): 37-44.
- Hyrsl, J. « Gemstones of Peru. » *The Journal of Gemmology* 27(6) (2001): 328-334.
- Hyrsl, J. *Gemas del Peru antiguo y moderno*. Lima: Asociacion Andrés Del Castillo, Museo Andrés Del Castillo, 2016.

- INGEMMET, Sector Energia y Minas. *Atlas Catastral, Geologico, Minero y Metalurgico*. Lima : Ministerio de Energia y Minas, 2018.
- Jones & Segnit. « The nature of opal. Part 1: Nomenclature and constituent phases. » *J. Geol. Soc. Austral* 18 (1971): 57-68.
- Koivula, J., Kammerling, R. « More on Peruvian opals. » *Gem News dans Gems & Gemmology* 27 (1991): 259-260.
- Koivula & Kammerling 1991. Lab News
- McOrist, G.D., Smallwood, A. « Trace Elements In Coloured Opals Using Neutron Activation Analysis. » *9<sup>th</sup> Australian Conference on Nuclear Techniques of Analysis*, Newcastle, Australia, (27-29/11/1995): 6-7.
- Ministerio de Energia y Minas Sector Energia y Minas. « Atlas Catastral, Geologico, Minero y Metalurgico. » Lima: INGEMMET, 2018.
- Nagase, T., Akizuki, M. « Texture and structure of opal-C in volcanic rocks. » *Can. Mineral.*, 35 (1997): 947-958. dans Fritsch, E., et al. « Relationship between nanostructure and optical absorption in fibrous pink opals from Mexico and Peru. » *European Journal of Mineralogy* 16 (2004): 743-752.
- Neville J. Curtis et al. « A Review of the classification of opal with reference to recent new localities. » *Minerals* 9 (299) (2019): 2-20. <https://doi.org/10.3390/min9050299> (consulté le 23 avril, 2020).
- Ostrooumov, M., et al. « Spectres Raman des opales : aspect diagnostique et aide à la classification. » *European Journal of Mineralogy* 11, (1999) dans Brajkovic, A., et al. « Blue and pink opals from Acari, Peru: Their optical, structural and spectroscopic features. » *The Australian Gemmologist* 23(1) (2007): 4.
- Quinn, E. P. « Peruvian Blue Opal. » *Gem News International, Gems & Gemology* (2003): 332.
- Rondeau, B. « Origine de la couleur et structure des opales communes. » *Diplôme d'Université de Gemmologie, Université de Nantes* (1998): 1-62.
- Rondeau, B. et al. « Opals from Slovakia ("Hungarian" opals): a re-assessment of the conditions of formation. » *European Journal of Mineralogy* 16(5), (2004): 789-799.
- Schumann, W. *Guide Delachaux : Pierres précieuses fines et ornementales*. Paris: Delachaux et Niestlé, 2015.
- Tumialan De La Cruz, P. « Yacimientos de minerales metalicos del Peru. » *Re. Inst. Investig. Fac. Minas Metal cienc. Geogr* 1 (1998), dans Brajkovic, A., et al. « Blue and pink opals from Acari, Peru : Their optical, structural and spectroscopic features. » *The Australian Gemmologist* 23 (2007): 5.
- Vidal, J. Carte géologique A-030 d'Acari et de Yauca. *Institut de Géologie et des Mines, Secteur Energie et Mines de la République du Pérou*, (1998) 31n-32-n.

## SITES INTERNET

- EBAY, [www.ebay.com](http://www.ebay.com) (visité le 11 mai 2020) :
  - Peruvian blue opal  
([https://www.ebay.fr/sch/i.html?from=R40&trksid=m570.l1313&nkw=Peruvian+blue+opal&\\_sacat=0](https://www.ebay.fr/sch/i.html?from=R40&trksid=m570.l1313&nkw=Peruvian+blue+opal&_sacat=0))
  - Blue opal  
([https://www.ebay.fr/sch/i.html?odkw=Peruvian+blue+opal&\\_osacat=0&from=R40&trksid=m570.l1313&nkw=Blue+opal&\\_sacat=0](https://www.ebay.fr/sch/i.html?odkw=Peruvian+blue+opal&_osacat=0&from=R40&trksid=m570.l1313&nkw=Blue+opal&_sacat=0))
  - Andean blue opal  
([https://www.ebay.fr/sch/i.html?odkw=Blue+opal&\\_osacat=0&from=R40&trksid=m570.l1313&nkw=Andean+Blue+opal&\\_sacat=0](https://www.ebay.fr/sch/i.html?odkw=Blue+opal&_osacat=0&from=R40&trksid=m570.l1313&nkw=Andean+Blue+opal&_sacat=0))
  
- Gem Rock Auction, <https://www.gemrockauctions.com/fr> (visité le 14 avril 2020)
  - <https://www.gemrockauctions.com/fr/search?keywords=Blue+opal>
  
- Opal Action, <https://www.opalactions.com/fr> (visité le 14 avril 2020)
  - <https://www.gemrockauctions.com/fr/search?keywords=Blue+opal>
  
- Wiki voyage. Pérou.  
[https://fr.wikivoyage.org/wiki/P%C3%A9rou#/media/Fichier:Peru\\_regions\\_naturales.png](https://fr.wikivoyage.org/wiki/P%C3%A9rou#/media/Fichier:Peru_regions_naturales.png).

Accédé le 24 avril 2020.