



REVUE SUR L'IRRADIATION

Cas pratique : Le diamant

RESUME

Comme la plupart des traitements, l'irradiation artificielle est utilisée en gemmologie pour améliorer ou créer la couleur des gemmes. En 1896, Henri Becquerel découvre la radioactivité en étudiant le phénomène de fluorescence. Une dizaine d'années plus tard, en 1904, du diamant est exposé à du radium et une coloration bleu-vert apparaît au bout de 6 à 7 mois. Des recherches ont suivi et en 1953 les premiers diamants irradiés par des réacteurs nucléaires ont été commercialisés. L'irradiation naturelle remonte à bien plus d'années de cela. Des gemmes ont pu être soumises à des irradiations pendant des millions d'années dans les profondeurs de la couche terrestre. Ce document présente des généralités sur l'irradiation (les sources possibles et les différents types), les gemmes principalement traitées par ce procédé et la facilité de leur identification.

Le cas du diamant est étudié plus en détails avec des analyses de spectre comparatives.

Emmanuelle Rol

Projet de diplôme

Laboratoire de Gemmologie de Marseille

N° étudiante : 809883

Avril 2015

1. Généralités

La radiation définit une propagation d'énergie émise par des particules ou par des ondes électromagnétiques [1]. Lorsque la radiation atteint un niveau suffisant pour déplacer des particules ou des atomes, elle devient ionisante et est appelée l'irradiation. La modification ou la création de la couleur est la résultante de ces mouvements de particules qui modifient l'organisation du réseau cristallin.

Les radiations naturelles sont à faibles doses non-ionisantes et ne sont aucunement perceptibles ou malsaines. Les rayons ionisants utilisés par l'homme, par exemple lors d'imageries médicales, sont contrôlés et un seuil limite légal est imposé afin de s'assurer que cela ne porte pas de préjudice à l'être humain. Ces risques de santé sont discutés au paragraphe 3.

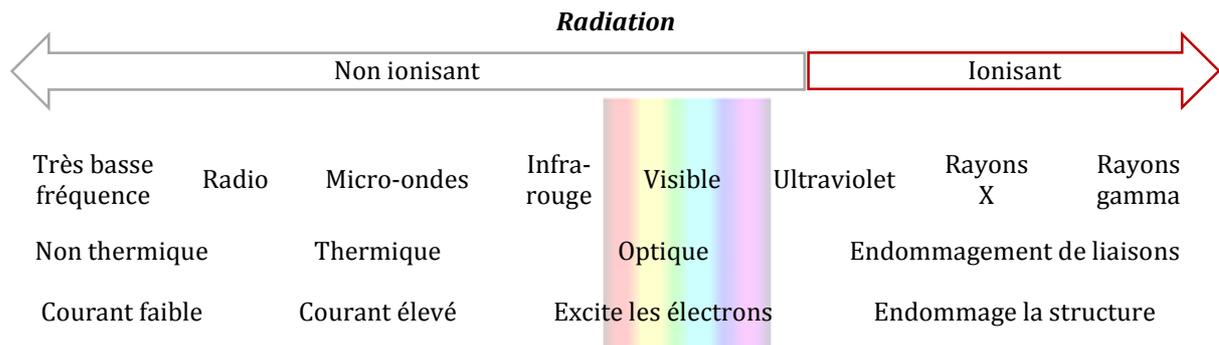


Tableau 1 : Tableau récapitulatif des radiations électromagnétiques [18]

Les sources de radiation sont multiples : de l'émission de lumière d'une lampe ou d'un feu à, dans le cas de rayons ionisants, la décomposition d'éléments radioactifs dont font partie l'uranium 238, le thorium 232 et le potassium 40 présents en grande majorité dans la croûte terrestre [1].

La décomposition de ces éléments radioactifs est spontanée et continue mais se fait par paliers selon les temps de vie des éléments en transition. A chaque étape, un nouveau type d'atome radioactif est formé et des radiations sont émises jusqu'à la formation d'un atome non-radioactif. Dans le cas de l'uranium, la fin de la décomposition amène à du plomb (figure 1).

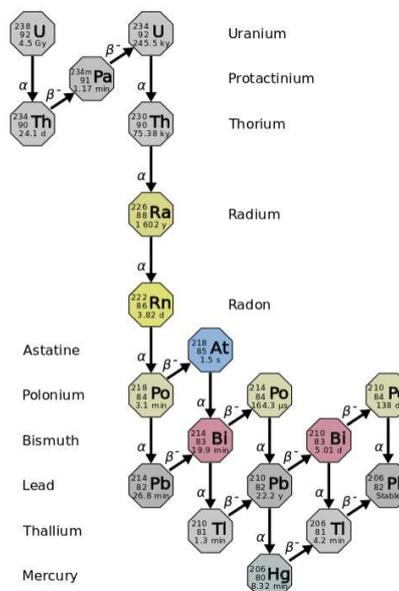


Figure 1 : Décomposition de l'Uranium

Des autres décompositions radioactives provenant de l'uranium 235 sont celles du strontium 90 et du césium 137. Ces éléments ont des longues durées de vie à l'échelle humaine puisqu'ils ont une période radioactive de 30 ans. L'accident de Tchernobyl a émis, en 1986, des quantités de ces isotopes qui ont été transportées notamment au travers des nappes phréatiques et des cours d'eau. De nombreux cancers de la thyroïde ont été déclarés suite à cet accident. Ces éléments, Sr et Ce, sont proches du calcium et se répandent dans l'organisme de la même manière que celui-ci, notamment dans les os. Des cancers des os et des leucémies sont craints si la moelle épinière est touchée ainsi que des pathologies cardiaques.

Dans la nature, des gemmes qui ont été proches de sources radioactives dans la croûte terrestre ou qui contiennent certains éléments radioactifs dans leur structure ont leur couleur influencée naturellement par ces radiations. Ces gemmes peuvent également contenir une certaine radioactivité résiduelle, appelée rémanence radioactive : le zircon, l'ekinite, l'euxenite, la fergusonite, la thorianite en sont des exemples (Tableau 2).

Quantité d'émissions radioactives						
<i>Faible</i>	<i>Faible - Euxenite</i>	<i>Zircon</i>	<i>Fergusonite</i>	<i>Ekanite</i>	<i>Thorianite</i>	<i>Très fort</i>
Pour 1 g :	80 Bq	85 Bq	1095 Bq	12132 Bq	39371 Bq	
Pour 1 kg :	0.112 mSv/h	0.124 mSv/h	1.514 mSv/h	17.821 mSv/h	49.489 mSv/h	

Tableau 2 : L'activité radioactive est donnée dans la deuxième ligne de ce tableau en Becquerel ; cela correspond au nombre de désintégrations radioactives par seconde. La troisième ligne donne les micro-sieverts par heure ; cette unité de mesure permet de quantifier l'impact d'un rayonnement ionisant sur les tissus biologiques [17]

Les radiations ionisantes peuvent se propager sous forme de particules alpha ou bêta, de rayons gamma ou de neutrons. Ces 4 types de radiations ont des énergies différentes et leurs effets sur les gemmes seront variables. Le Tableau 3 regroupe et donne les généralités sur les différents types de radiation.

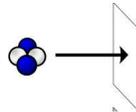
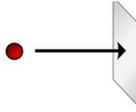
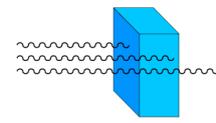
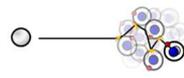
Type de radiation		Interaction avec gemmes	
Particules alpha	Atomes d'hélium sans électron à haute vitesse	α 	Ne pénètre pas dans la gemme. La coloration induite est confinée en extrême surface.
Particules bêta	Electrons à haute vitesse	β 	Les électrons sont absorbés par la gemme en fonction de leur énergie (vitesse).
Rayons Gamma	Photons de haute énergie	γ 	Pénétration possible dans un matériau dense et interactions avec les électrons secondaires pour modifier le réseau cristallin.
Neutrons	Particules subatomiques de masse non négligeable et de charge nulle qui composent le noyau d'un atome	n 	Réaction profonde des neutrons avec les noyaux d'autres atomes générant des rayonnements gamma

Tableau 3 : 4 types de radiations et interaction avec les gemmes [18]

Pour irradier les gemmes artificiellement, trois techniques de laboratoire sont principalement utilisées en fonction des pierres à traiter :

- L'irradiation au cobalt 60 émet des rayonnements β et γ . La pénétration dans les pierres varie en fonction de l'énergie du faisceau. Ce type de source radioactive est également utilisé pour tuer des bactéries dans les denrées alimentaires, au même niveau que la stérilisation et comme source de radiation médicale.

- Les accélérateurs linéaires (LINAC) irradient les gemmes grâce à un faisceau d'électrons. Si la vitesse des électrons est trop faible, la coloration sera focalisée sur le pourtour de la pierre et le traitement sera détectable. Avec une puissance suffisante, la pénétration sera assez grande pour obtenir une couleur d'aspect uniforme mais une trop forte puissance peut également engendrer de la radioactivité résiduelle dans les gemmes traitées.
Les gemmes traitées dans ce type d'installation doivent être refroidies à l'eau afin de ne pas chauffer. Une trop forte température engendrerait la destruction des centres de couleur.
A titre indicatif, cette source de radiation est également utilisée dans les appareils médicaux.
- Un réacteur nucléaire par décomposition d'uranium. L'avantage est que l'énergie liée aux neutrons est suffisante pour colorer l'ensemble d'une pierre, le désavantage est que les gemmes deviennent radioactives pendant le traitement et conservent une radioactivité résiduelle.

2. Gemmes couramment irradiées, leur couleur et leur stabilité

Comme l'irradiation artificielle des gemmes active les mêmes centres que l'irradiation naturelle, il est difficile d'identifier le naturel du traité. Le tableau 4 regroupe les gemmes couramment irradiées, les couleurs avant et après irradiation et la stabilité du traitement. Il est important de connaître ces pierres car l'irradiation ne sera pas forcément détectable par des techniques scientifiques mais un bémol doit être énoncé selon la couleur. Par exemple, les topazes de couleur bleue soutenue ont le plus souvent des cas été irradiées mais aucun moyen de détection n'est actuellement disponible en laboratoire pour valider cette affirmation.

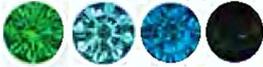
Matériaux	Couleur avant traitement	Couleur après irradiation	Stabilité	Figures
Béryl	Incolore, bleu, incolore (Maxixe)	Jaune, vert, bleu		
Diamant	Incolore ou jaune/brun	Vert à bleu, une forte saturation donne une couleur noire	Stable	
Fluorite	Incolore	Variable		
Perles	Couleur pâle	Gris, noir, bleu-gris		
Quartz	Incolore à jaune, Vert pâle	Brun, violet, rose		
Kunzite	Rose	Verte		
Topaze	Jaune, orange Incolore ou bleu pâle	Couleurs intenses Brun, bleu, vert	Stable avec un trait. thermique	
Tourmaline	Incolore ou pales, bleu	Jaune, brun, rose, rouge, vert et rouge, pourpre		
Zircon	Incolore	Brun, rouge		

Tableau 4 : Ce tableau répertorie les gemmes couramment irradiées, les couleurs avant et après traitement et leur stabilité. Sources [gemplus.com, images google]

Le risque principal de ce traitement réside dans le fait que la couleur induite par le traitement peut être instable au soleil ou à la chaleur. Deux tests ont été mis au point pour déterminer si une pierre a été irradiée :

- « Fade test » : Une pierre est exposée 12 h à la lumière. Si la pierre ternit, les centres de couleur étaient instables et la couleur provenait d'une irradiation.

- Un deuxième test consiste à exposer pendant 1 heure à la lumière et à la chaleur. Ce test est plus rapide mais des risques de fissuration de la pierre sont présents.
- Dans un test comme dans l'autre, le caractère naturel ou artificiel de l'irradiation n'est pas pris en compte.

3. Santé



Toute dose de radioactivité reçue peut induire des problèmes de santé. Le risque est proportionnel à la dose d'irradiation reçue : brûlures, nausées, fibroses, cataractes, cancers et leucémies peuvent être liés à des réactions suite à une trop forte exposition à des radiations ionisantes. Il est par ailleurs impossible de distinguer un cancer apparu suite à une consommation de tabac trop importante ou suite à des expositions à de la radioactivité.

Pour la population, la limite annuelle d'exposition de 1 mSv s'applique à la somme des doses reçues en dehors de la radioactivité naturelle et de la médecine. Si on appliquait cette limite à ces deux dernières causes et pour rester en dessous des seuils limites, on ne pourrait pas subir de scanner, il faudrait renoncer à l'avion, abandonner l'alpinisme, ou ne pas habiter dans les régions granitiques de France [ISRN.fr]. Les normes actuelles sont basées sur les lésions observées à la suite des explosions d'Hiroshima et Nagasaki.

A titre indicatif :

- A partir de 1 mSv/h, des effets biologiques dangereux sont observés. Ce seuil est bien en dessous de ce que peuvent émettre certaines des pierres radioactives présentées dans le Tableau 2.
- Les personnes qui travaillent avec des radiations ionisantes ont une limite fixée à 20 mSv par année.
- La limite actuelle cancéreuse annuelle se situe à 100 mSv.
- La Figure 2 ci-dessous représente les effets des radiations nucléaires sur le corps humain

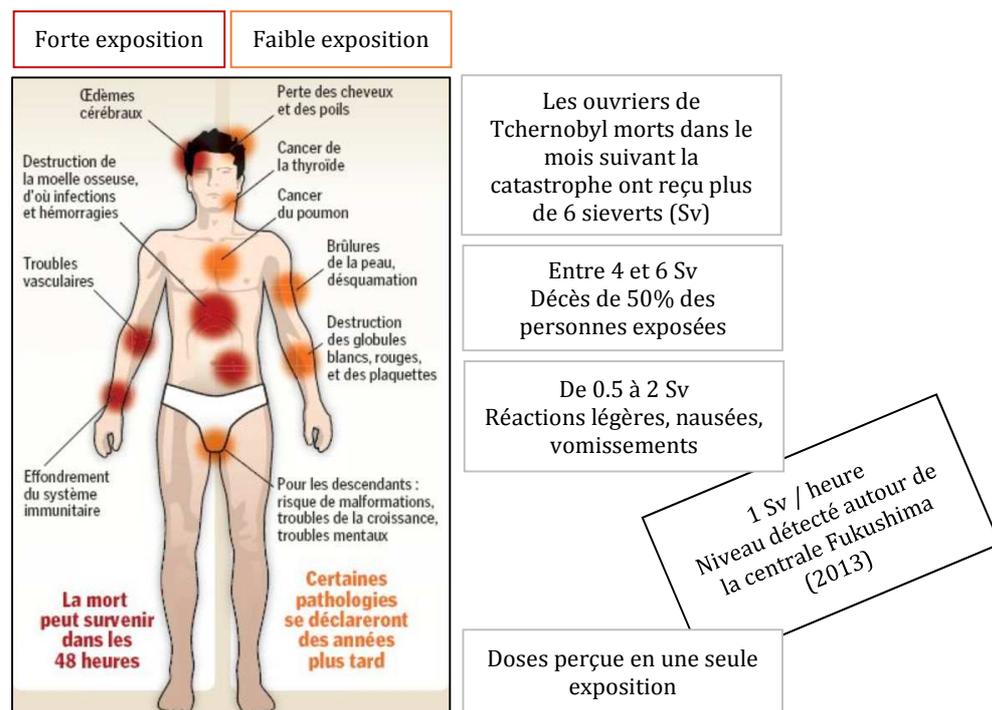


Figure 2 : Effets des radiations nucléaires sur le corps humain [www.laradioactivité.com – The Washington Post]

4. Cas pratique : Diamant

Les diamants sont depuis bien longtemps connus comme des pierres de grande valeur de par leurs propriétés remarquables de réflexion, de résistance à la rayure et de stabilité. Les diamants incolores sont recherchés pour leur pureté et la mode actuelle met en valeur des diamants de couleur. Une certaine quantité de diamant de qualité gemme sont de couleur indésirable en sortie de mine et des traitements tels que l'irradiation ou le chauffage sont utilisés pour les valoriser.



Figure 3 : Diamant taillé

Source : Bijouterie-joaillerie.fr

◆ Irradiation naturelle

L'irradiation naturelle des diamants est généralement localisée sous forme de taches vertes (non chauffé) à orange-brun (chauffé par la taille) à la surface des diamants bruts. La plupart du temps cette coloration est enlevée lors de la taille de la pierre, l'irradiation n'ayant impacté que la surface. Les Figures 4 et 5 sont des exemples de marques colorées de surface engendrée par l'irradiation.

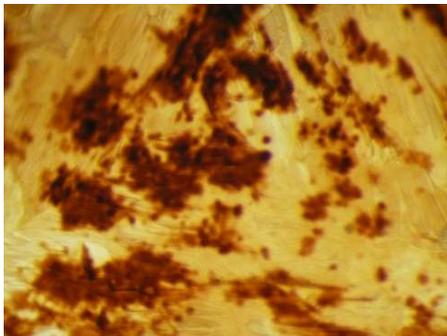


Figure 4 : Marques d'irradiation naturelle à la surface d'un diamant (Photo GGTL-laboratories)



Figure 5 : Marques d'irradiation naturelle à la surface d'un diamant (Photo geminterest.com)

◆ Irradiation en laboratoire et centres de couleur

Dans les années 1950, les cyclotrons, dont le fonctionnement est brièvement expliqué en Figure 6, sont capables d'accélérer suffisamment des électrons pour irradier du diamant et lui donner ainsi une couleur bleu-vert, vert, jaune ou brun. Les gemmes de couleur jaune ou brune sont en réalité obtenues par l'échauffement de la pierre lors du bombardement. L'apparition des réacteurs nucléaires permettra de donner à la pierre une couleur verte plus profonde et plus uniforme.

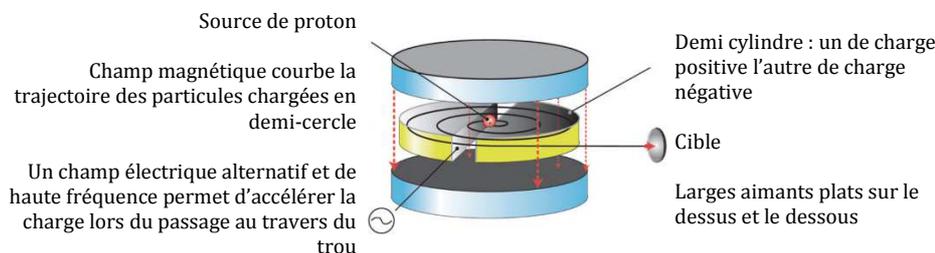


Figure 6 : Fonctionnement d'un cyclotron – Utilisation de champs électromagnétiques pour accélérer des particules.

Source [http://atomic.lindahall.org]

La couleur résultante de l'irradiation d'un diamant provient des lacunes créées dans le réseau atomique. Des atomes substitutionnels du réseau cristallin sont éjectés et se retrouvent en position d'atomes interstitiels. Une absorption du spectre est alors observée dans le visible proche de l'infrarouge.

Pour obtenir une pénétration d'environ 3mm, l'énergie requise est de 3 MeV.

Un traitement thermique au-dessus de 500°C dans une atmosphère neutre peut être couplé au traitement d'irradiation pour obtenir des couleurs orangées par migration des lacunes. Les lacunes se couplent à de l'azote pour former des nouveaux centres de couleurs.

◆ Identification

Anciennement, une localisation de couleur à la pointe de la culasse, appelé effet *umbrella* (parapluie), pouvait être observée là où le faisceau ionisant était focalisé (Figures 7 et 8).

Les diamants bleus naturels sont colorés par la présence de bore et sont conducteurs électriques. Ils peuvent alors être séparés des diamants bleus obtenus par irradiation car ceux-ci sont isolants.

Pour les traitements récents et autres couleurs, il est très difficile d'obtenir des identifications précises. La raison réside toujours dans le fait que les diamants ont tout aussi bien pu être irradiés naturellement lors de leur formation qu'en laboratoire par un procédé artificiel.

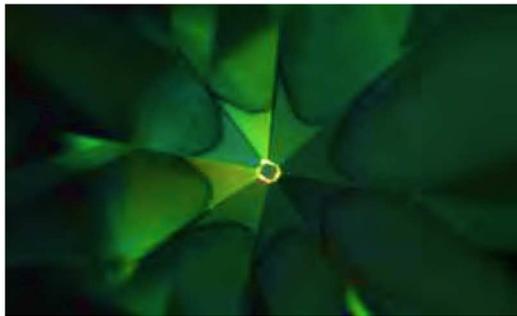


Figure 7 : Effet parapluie, signe typique d'un traitement par irradiation dans un cyclotron. Cette apparence est causée par des réflexions internes dans un diamant taillé. Photomicrographie de John I.Koivula, grossissement 10x [15]



Figure 8 : Culasse d'un diamant irradié par des électrons de basse énergie dans un accélérateur linéaire. La couleur est concentrée sur la pointe de la culasse. Photomicrographie de Wuyi Wang, grossissement 5x [15]

Des analyses au spectromètre UV-visible sont effectuées pour déterminer les centres de couleur actifs. Au cours du test, la pierre analysée est refroidie par de l'azote liquide. Cela permet d'obtenir des spectres plus nets en affinant les pics et en les rendant plus distincts. Ce phénomène est lié à la diminution de l'agitation thermique des atomes à basse température. Un pic connu sous le nom de GR1 (General Radiation) est visible à 741nm. La hauteur de ce pic est fonction de la saturation de la couleur et donc de la radiation reçue.

Selon le type de diamant (Ia ou Ib), les couleurs résultantes de l'irradiation vont être variables selon l'interaction entre les défauts existants (figure 9) et les lacunes créées.

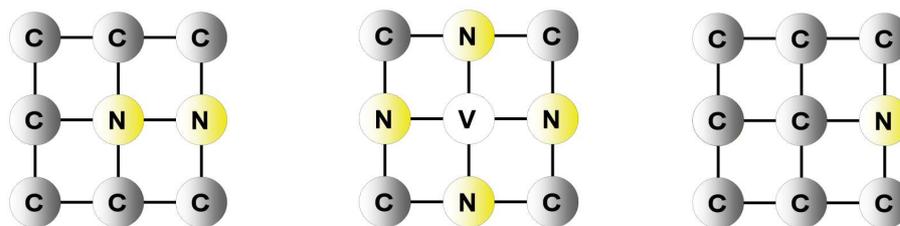


Figure 9 : Représentation simplifiée en plan de la répartition des atomes d'azote (N) dans un diamant de type Ia et Ib.

- Agrégats A : Deux atomes d'azote en substitution d'atomes de carbone
- Agrégats B : Quatre atomes d'azote en substitution d'atomes de carbone autour d'une lacune
- Agrégats C : Atome isolé d'azote en substitution d'atomes de carbone

Source [Smith & al 2000]

Prenons l'exemple des diamants les plus courants, de type Ia ; les défauts peuvent être composés de paires d'atomes d'azote voisins (A), de quatre atomes d'azote entourant une lacune (B) ou d'un mélange des défauts (A) et (B). Le spectre infrarouge entre 1000 et 1400 cm^{-1} permet de faire la distinction entre ces deux types de défauts. L'interaction entre ces défauts et les lacunes créées par l'irradiation (Figure 10) va mener à des nouveaux centres de couleur, respectivement les centres H3 et H4. [4]

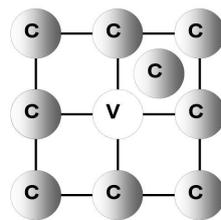


Figure 10 : Représentation simplifiée en plan de la répartition en plan d'un atome de carbone déplacé de son site structural (V) et d'un carbone interstitiel.

Source [Smith & al 2000]

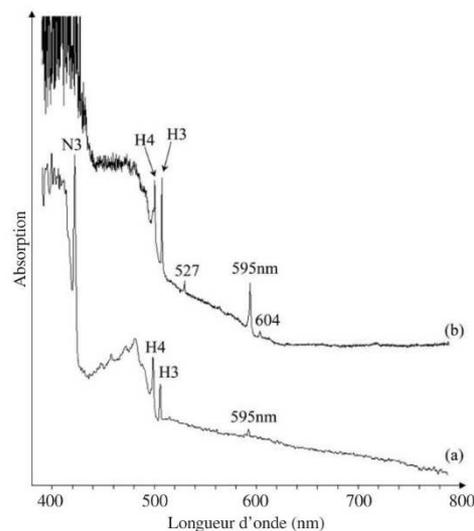


Figure 11 : Centres H3 et H4 observables dans un spectre UV-Vis

Ces centres de couleur peuvent être observés aussi bien sur des diamants naturels que sur des diamants traités et ne permettent donc pas d'être catégorique sur la nature de la radiation.

Deux centres supplémentaires H1b (4940 cm^{-1}) et H1c (5170 cm^{-1}) ont été observés actuellement uniquement dans les diamants traités. Ces centres correspondent à des captures de centre GR1 par des défauts (A) et (B). [4]

Deux diamants jaunes de type Ia de la collection de Monsieur F. Notari sont présentés en Figure 12 ; l'un est naturel, l'autre est irradié et chauffé. Leurs spectres infrarouges ont été effectués (Figure 13) pour mettre en évidence la présence des centres H1b et H1c définis ci-dessus.

Un zoom dans la zone d'intérêt est donné en Figure 14. Les positions des deux pics recherchés sont mises en évidence en pointillés. Il peut être observé que le diamant naturel (spectre violet) ne présente aucun pic dans cette zone de mesure alors qu'un pic à 4940 cm^{-1} est visible sur le spectre rouge du diamant irradié et chauffé. Le pic à 5170 cm^{-1} n'est pas distinguable car il est fondu dans le bruit de fond du spectre. Ces analyses permettent de prouver l'origine naturelle ou artificielle de la couleur jaune des deux diamants testés.



Figure 12 : En (a), diamant jaune naturel, en (b), diamant jaune irradié et chauffé (Collection de F. Notari, GGTL-laboratories)

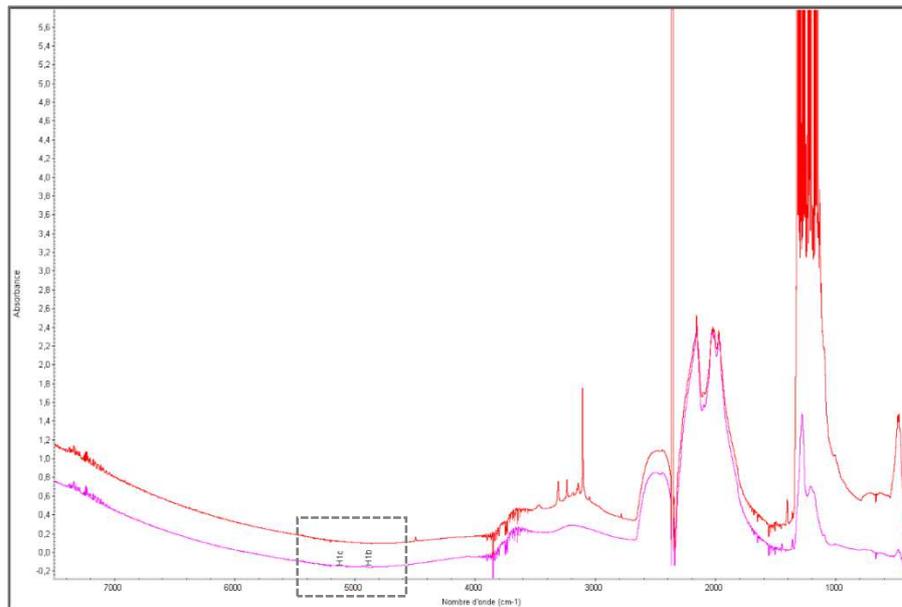


Figure 13 : Spectre infrarouge, en rouge d'un diamant jaune irradié naturellement et en rose d'un diamant jaune irradié et chauffé

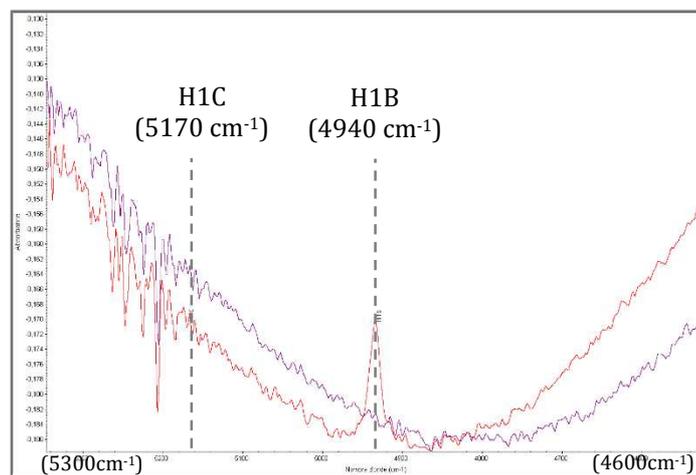


Figure 14 : Zoom sur la zone d'intérêt du spectre infrarouge pour observer les centres H1b et H1c

◆ **Traitements combinés**

Les couleurs obtenues par irradiation sont instables à la température. En effet une simple réparation de bijoux en atelier peut altérer la couleur et passer du vert/bleu au brun/orange. Une température de 275°C permet de créer un premier centre coloré à 595nm composé d'un défaut ponctuel d'azote et de lacunes. Autour de 1000°C ce centre a tendance à disparaître et en même temps, d'autres centres de couleur sont créés puis détruits (4).

Un traitement d'irradiation suivi d'un traitement HPHT (haute pression haute température) permet donc d'obtenir toutes les couleurs du spectre et ce de façon permanente en modifiant l'équilibre du réseau cristallin, de ses impuretés et de ses lacunes. Un maintien sous haute pression pendant le traitement thermique (>1400°C) est essentiel pour maintenir le carbone sous forme de diamant, et éviter une graphitisation qui intervient rapidement à des températures de 1800°. En-dessous de 1400°C la cinétique de transformation est lente et des hautes pressions ne sont pas requises.

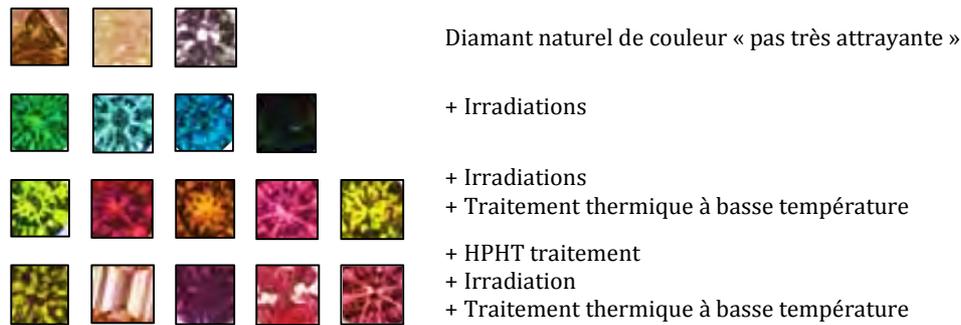


Figure 15 : Images reprises d'une figure de Christopher M. Breeding [15]

Sur la Figure 16, une série de diamants provenant de la collection de Monsieur Notari, GemTechLab, est donnée. Elle permet de se rendre compte des différentes couleurs de diamant obtenues par irradiation et traitement thermique. Les couleurs obtenues sont variées : la concentration en lacunes et en azote diffèrent selon les pierres et la mobilité est variable selon la température de traitement thermique.



Figure 16 : Images reprises d'une figure de Christopher M. Breeding

5. Marché

Une liste de prix de diamants d'environ 0.5 carat certifiés GIA est donnée en annexe. Les prix des diamants naturels des couleurs correspondantes sont donnés à titre comparatif. Ces prix sont tirés de vente en ligne. Une fourchette de prix, en fonction de la couleur et de la qualité de la taille et du poli, est donnée pour chaque type de diamant ci-dessous [21, 22, 23, 24] :

- Diamant incolore de 0.5 carat - VS1 : De 1500 à 2500€
- Diamant irradié « fancy color » de 0.5 carat - VS1 : 1175€
- Diamant naturel « fancy color » de 0.5 carat - VS1 : De 2000€ et 6500€

6. Conclusion

Les traitements quels qu'ils soient peuvent être intéressants pour le secteur de la bijouterie afin de pouvoir se procurer toutes sortes de couleur et de qualité de gemmes. Par ailleurs il faut rappeler que le vendeur a le devoir de mentionner le traitement à ses acheteurs.

Concernant plus précisément les traitements par irradiation : des normes de sécurité sont également en vigueur pour s'assurer que les gemmes mises sur le marché n'émettent aucune irradiation résiduelle pouvant être néfaste à la santé de l'homme. Certaines topazes sont par exemple stockées de quelques mois à quelques années pour laisser se dissiper cette irradiation avant une mise en vente. Certaines pierres sont radioactives mais restent bien en dessous des doses dangereuses pour l'homme. Il faut malgré tout se protéger de ces pierres et ne pas rester en contact direct av elles.

L'identification de l'irradiation est effectuée par spectroscopie en laboratoire. La nature de l'irradiation est difficile à identifier car les mécanismes activés naturellement ou artificiellement sont similaires.

Dans les diamants jaunes étudiés, le pic GR1 à 741nm prouve que les pierres ont été irradiées mais il faut aller chercher les pics H1c et H1b à 5170 ou 4950cm⁻¹ pour déterminer l'origine naturelle ou artificielle de celles-ci.

La plupart des pierres, notamment la topaze, ne montrent pas de pics spécifiques et il est impossible de déterminer si la pierre est naturelle ou traitée.

Il faut donc se tenir continuellement informé des analyses en laboratoire afin de se poser les bonnes questions devant une pierre de couleur « anormalement » incolore ou colorée.

Remerciements

Je remercie Candice Caplan et le Laboratoire GGTL de M. Franck Notari à Genève pour le temps accordé et la mise à disposition des diamants.

Merci également à Agata Cristol qui m'a soutenue dans ce projet depuis Marseille.

7. Bibliographie

- 1 "Gemstone irradiation and radioactivity", Charles Ashbaugh, Gem & Gemmology, p. 196 à 213 Winter 1988
- 2 "Gamma-Ray spectroscopy to measure radioactivity on gemstone", Charles Ashbaugh, Gem & Gemmology, p.104 à 111, Summer 1992
- 3 "The identification of artificial coloration in diamond", Kenneth V.G. Scarrat, Gem & Gemmology, p.72 à 78, 1982
- 4 "Diamant de couleur traités par irradiation puis chauffage à basse température", Dr. Éric Erel, Revue de gemmologie n° 164, Juin 2008
- 5 "Reactor-irradiated Green topaz", Charles Ashbaugh and James Shigley, Gem & Gemmology, p.116 à 121, Summer 1993
- 6 "The radioactive decay pattern of blue topaz treated by neutron irradiation", Jian Zhang, Taijin Lu, Mangu Wang, Hua Chen, Gems & Gemmology, p. 302 à 307, Winter 2011
- 7 "Treated fancy red diamond", Paul Johnson and Christopher M Breeding, GIA Laboratory N.-Y., New from research, June 2009
- 8 "Using the DTC DiamondView to detect irradiation-induced defects in à Brown orange diamond", Sally Chan and Paul Johnson, GIA Laboratory, 2010
- 9 "A large Irradiated Green-Yellow Diamond", Wuyi Wang, Paul Johnson and Emiko Yazawa, Gem & Gemology Lab notes n°49, Summer 2013
- 10 "An introduction to gem treatment", Robert Weldon, Gem and Gemmology website, 2014
- 11 "An history of diamond treatment", Thomas W. Overton and James Shigley, Gem and Gemmology, p.32 à 55, Spring 2008
- 12 "Luminescence sous excitation visible des diamants noirs irradiés : les luminescentes d'arrêtes", P.Y. Boillat, F. Notari, C. Grobon, Revue de Gemmologie AFG, N° 141/142, pp. 37-41, 2001
- 13 "Optical absorption of gamma irradiated and heat treated natural quartz", E.H. Martins, F.S. Lameiras, Material Research vol.8 n°3, Sept. 2005
- 14 "Gemstones enhancement and its detection in the 2000s", S.F. McClure, R.E. Kane, N.Sturman, Gem & Gemology, p.218 à 240, Fall 2010
- 15 "Photo-induced H1b and H1c centers in some natural treated diamonds", E.Gaillou, E.Fritsch, F.Notari, Diamond & Related material 17, 2019-2036, 2008
- 16 "Nouvelles absorptions photo-induites dans le diamant", Eloïse Gaillou, DUG, 2005
- 17 "GE POL Diamonds; Before and after," Smith C.P., Bosshart G., Ponahlo J., Hammer V.M.F., Klapper H., Schmetzer K., Gems & Gemology, p 192 à215, 2000
- 18 "Tchernobyl, 25 ans après, Fukushima: quel avenir pour le nucléaire" Michel Chouha, Paul Reuss, 2011
- 19 Site internet www.webmineral.com
- 20 Site internet www.wikipedia.com
- 21 Site internet www.diamants-infos.com
- 22 Site internet www.couleur-diamants.com
- 23 Site internet www.gemfrance.com
- 24 Site internet www.prismgem.com

Annexe – Prix de diamant [21, 22, 23, 24]

<i>Couleur</i>	<i>Taille</i>	<i>Naturel/irradié</i>	<i>Carats</i>	<i>Prix</i>	<i>Figures</i>
Incolore - D	Rond Brillant	Naturel	0.50 - VS2	De 2500 à 3500 €	/
Incolore - I	Rond Brillant	Naturel	0.5 - VS2	De 1500 à 2000 €	/
Fancy yellow	Rond Brillant	Naturel	0.50 - VS2	2037 €	/
Fancy yellow brownish orangy	Rond Brillant	Naturel	0.55 - VS2	4261 €	/
Fancy yellow brown	Rond Brillant	Naturel	0.50 - VS2	1386 €	/
Fancy vivid Yellow	Coussin	Naturel	0.51 - VS2	6500 €	
Yellow	Pear	Naturel	0.47 - /	3625 €	
Yellow	Rond Brillant	Irradié	0.60 - VS2	1175 €	
Very light green	Rond Brillant	Naturel	0.51 - VS2	4994 €	/
Green	Rond Brillant	Irradié	0.54 - VS2	1175 €	
Pink	Coussin	Naturel	0.62 - VS1	3712 €	
Light pink	Rond brillant	Naturel	0.50 - VS1	6302 €	/
Faint Pink	Rond brillant	Naturel	0.50 - VS1	De 6402 à 1402 €	/
Pink	Rond brillant	Naturel	0.50 - VS1	1175 €	