

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Formes idéales analysées au moyen d'axes de rotation .....	5
Figure 2 : Minéraux non silicatés .....	12
Figure 3 : Minéraux silicatés .....	13
Figure 4: Diamond clarity grading .....	25
Figure 5 : Secteurs finaux employant les terres rares comme intrant.....	33
Figure 6 : Principales industries de produits semi-finis utilisant les terres rares légères comme intrants .....	34
Figure 7: Principales industries de produits semi-finis utilisant les terres rares lourdes, avec l'Yttrium et le Scandium comme intrants.....	35
Figure 8 : Exemple d'un flow-sheet de séparation des terres rares (1500 étages de séparation) ..	39
Figure 9 : Cycle d'abstraction pour la conception d'un SI avec les modèles MERISE .....	52
Figure 10 : Exemple d'entité .....	53
Figure 11 : Exemple d'association .....	54
Figure 12 : MCC.....	56
Figure 13 : MCD.....	57
Figure 14 : MPD .....	60
Figure 15 : MCT .....	62
Figure 16 : Fenêtre d'accueil de WinDev 20.....	63
Figure 17 : Fenêtre d'accueil du progiciel.....	66
Figure 18 : Fenêtre liste des minéraux.....	67
Figure 19 : Onglet «Insertion » de la fenêtre menu .....	68
Figure 20 : Onglet «Recherche » et formulaire de « Tous » .....	70

Figure 21 : Fenêtre de modification de terre rare .....	71
Figure 22 : Etat gemme.....	73
Figure 23 : Fenêtre du centre de contrôle de HFSQL.....	75

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 : Caractéristiques des sept systèmes cristallins.....	6
Tableau 2 : Quelques exemples de couleurs de pléochroïsme .....	19
Tableau 3 : Appréciation de l'éclat des minéraux transparents.....	21
Tableau 4 : Classification des éléments de terres rares .....	30
Tableau 5 : Structures électroniques des éléments de terres rares.....	31
Tableau 6 : Entités-associations.....	57

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

d : densité

F : Faces centrées

Frk : foreign key

g : gramme

I : Innenzentriert

P : primitive

ppm : parties par million

Prk : primary key

R : rhomboédrique

## **LISTE DES ACRONYMES**

- BD : Base de Données
- CAO : Conception Assistée par Ordinateur
- EDI : Edition de Documents Informatisés
- ESPA : Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
- ETR : Élément de Terres Rares
- GPAO : Gestion de Production Assistée par Ordinateur
- HFSQL : HyperFileSQL
- IOCG: Iron-Oxide Copper-Gold
- IR : Indice de réfraction
- MCC : Modèle Conceptuel de la Communication
- MCD : Modèle Conceptuel des Données
- MCT : Modèle Conceptuel des Traitements
- MERISE : Méthode d'Etude et de Réalisation Informatique pour les Systèmes d'Entreprise
- MLD : Modèle Logique des Données
- MLDR : Modèle Logique des Données Relationnelles
- MOPT : Modèle Opérationnel ou Physique des Traitements
- MOT : Modèle Organisationnel des Traitements
- MPD : Modèle Physique des Données
- MPMP : Ministère auprès de la Présidence chargé des Mines et du Pétrole
- ODBC : Open Database Connectivity
- SGBD : Système de Gestion de Base de Données
- SGBDR : Système de Gestion de Base de Données Relationnelles

SI : Système d'Information  
SIG : Système d'Information Géographique  
SQL: Structured Query Language  
TR : Terre Rare  
TRLE : Terre Rare Légère  
TRLO : Terre Rare Lourde  
TV : Télévision  
UV : Ultra-Violet  
UVC : Ultra-Violet Court  
UVL : Ultra-Violet Long

## **LISTE DES ANNEXES**

Annexe 1 : Structure cristalline  
Annexe 2 : Caractères de reconnaissance des minéraux  
Annexe 3 : La couleur des gemmes  
Annexe 4 : Propriétés des minéraux gemmes  
Annexe 5 : Phénomènes optiques  
Annexe 6 : Luminescence  
Annexe 7 : Inclusions  
Annexe 8 : Les instruments gemmologiques  
Annexe 9 : Terres rares

# **SOMMAIRE**

## **INTRODUCTION**

### **PARTIE I : GENERALITES SUR LA MINERALOGIE, GEMMOLOGIE ET LES TERRES RARES**

Chapitre I. La minéralogie

Chapitre II. La gemmologie

Chapitre III. Les terres rares

### **PARTIE II : CONCEPTION DU PROGICIEL DE MINERALOGIE, GEMMOLOGIE ET DE TERRES RARES**

Chapitre IV. Présentation du thème

Chapitre V. Conception du système d'information

Chapitre VI. Réalisation et mise en œuvre du progiciel

## **CONCLUSION**

## INTRODUCTION

Au cours de la formation des couches constitutives de la Terre, les silicates plus légers remontent pour former le manteau et la croûte, et les éléments plus lourds atteignent le centre de la Terre afin de constituer le noyau. Ainsi, le noyau est principalement composé de fer, avec un faible pourcentage de nickel et d'autres éléments. Le manteau supérieur, moins visqueux par rapport à celui inférieur, est constitué de silicates de fer et de silicates de magnésium, tels que l'olivine et les pyroxènes. Mais, il est possible que la partie inférieure de ce dernier soit formée d'un mélange d'oxydes de magnésium, de silicium et de fer. Concernant la croûte, celle profonde regroupe les roches plus denses qui sont des roches basaltiques, et formant le fond des bassins océaniques, alors que la croûte continentale est formée de roches éruptives et de roches sédimentaires, dont la composition chimique est proche de celle du granite.

Dû aux mouvements de convection se produisant au niveau du manteau, les plaques tectoniques formées par les roches de la croûte et du manteau supérieur, se déplacent et provoquent les éruptions volcaniques. Outre, la transformation de ces roches sous l'effet de la température et la pression induit aux formations des roches métamorphiques. Ainsi, les hommes se reposent sur un grand nombre de roches et de minéraux pouvant être exploités afin de subvenir à leurs besoins.

Concernant Madagascar, la "Grande Ile" possède un potentiel métallogénique qui n'a pas été réellement valorisé pendant la deuxième République malgache (Giuliani et al. 2008). Actuellement, les ressources minérales non métalliques représentent un intérêt économique important pour le pays, notamment les pierres précieuses (rubis, saphir, émeraude) et pierres fines (aigue marine, grenat, spinelle, et tourmaline). Plus de 50 variétés de pierres gemmes sont exportées sur le marché international par Madagascar (Milisenda, 2000). La plupart des pierres semi-précieuses qui ont assis la réputation de la Grande Ile proviennent des pegmatites avec l'héliodore, l'aigue-marine, les tourmalines polychromes, la kunzite, la morganite, l'orthoclase jaune et l'amazonite. Des pierres colorées de valeurs minéralogique et commerciale ont été trouvées récemment en particulier les grenats (almandin, rhodolite, spessartite et grossulaire vanadifère), la londonite, et la pezzotaite, et ainsi que des minéraux rares comme la grandidiérite et la korerupine décrits au siècle dernier (Lacroix, 1922a).

En outre, l'étude de la géologie du complexe annulaire alcalin d'Ambohimirahavavy, au nord-ouest de Madagascar, met l'accent sur l'existence des minéralisations à métaux rares (Zr, Hf,



Nb, Ta, Th, U et terres rares). Indispensables et pourtant très peu connues du grand public, les terres rares ou éléments de terres rares, apparaissent au niveau mondial parmi les métaux les plus demandés ces dernières décennies. Défense, santé, énergie, agriculture, télécommunications, aucun domaine ne se passe aujourd'hui des terres rares, et de nouvelles applications ne cessent de voir le jour. Certes, dans le domaine des nouvelles technologies, leurs propriétés magnétiques et optiques exceptionnelles font de cette ressource un enjeu de premier plan. Cependant, leur gisements sont généralement très peu concentrés et leur exploitation n'est pas possible. De nombreux gouvernements ont classé les terres rares sur leur liste des matières premières les plus critiques. En effet, depuis plusieurs années, la Chine, le plus grand producteur de terres rares, a imposé des quotas à l'exportation pour ces éléments et les a progressivement réduits. Or, la demande en terres rares est amenée à augmenter dans les prochaines années en raison de leur utilisation croissante dans diverses applications. Les gouvernements et les industries craignent donc une pénurie de leurs approvisionnements et cherchent de nouvelles sources d'approvisionnement pour satisfaire leurs besoins.

De tout ce qui précède, le secteur minier offre de grandes opportunités pour le développement socio-économique à Madagascar, ce dernier pourra devenir l'un des piliers de l'économie malgache. Mais avant toute chose, il est primordial de savoir distinguer et reconnaître les substances existantes, étant donné leur grande diversité. De plus, avoir une certaine propriété et information sur ces dernières permettent de les valoriser et de déterminer leur propre utilisation. Cette étape de reconnaissance et de caractérisation des minéraux et gemmes sont groupées dans deux disciplines appelées minéralogie et gemmologie.

Ainsi, avoir une base de données sur la minéralogie et gemmologie, ainsi que les terres rares s'avèrent pratique, et puis, la manipulation de cette dernière sera facilitée avec une interface graphique d'un logiciel interactif. Ainsi, le thème « **conception d'un progiciel de minéralogie, gemmologie et de terres rares** ». Le corps du présent ouvrage comporte deux grandes parties, à savoir:

- Généralités sur la minéralogie, gemmologie et les terres rares ;
- Conception du progiciel de minéralogie, gemmologie et terres rares.



**PARTIE I :**

**GENERALITES SUR LA**

**MINERALOGIE, GEMMOLOGIE**

**ET LES TERRES RARES**

## CHAPITRE I. LA MINERALOGIE

La minéralogie est la science qui étudie les minéraux (origine, formation, évolution, classification) et qui cherche à déterminer leurs caractéristiques physiques et chimiques. Elle est née au XVIII<sup>ème</sup> siècle, en même temps que la cristallographie, dont elle a été longtemps indissociable. Elle est étroitement liée à la géologie, dont on peut considérer qu'elle fait partie. <sup>[1]</sup>

Les minéraux sont présents dans les roches de la croûte de la Terre ou d'autres corps célestes du Système solaire, comme les planètes, les satellites naturels et les météorites. La minéralogie descriptive permet de connaître leur origine, mode de formation, évolution, composition chimique, structure, ainsi que leurs propriétés physiques et chimiques. En outre, l'identification des minéraux selon les propriétés chimiques, physiques et cristallographiques fera l'objet de la minéralogie déterminative.

### I.1. Structure cristalline

L'étude des cristaux montre qu'ils possèdent en nombre plus ou moins grand des plans, des axes, et des centres de symétrie ; on le voit en particulier par la symétrie d'orientation des faces (qui est le reflet d'une symétrie à l'échelle atomique). Ainsi, pour un cristal automorphe d'un minéral déterminé, les angles entre les faces sont constants, quels que soient la taille du cristal et le développement relatif des diverses faces. L'étude de ces propriétés de symétrie a permis de définir 14 types de réseaux cristallins (les réseaux de Bravais) eux-mêmes liés à 7 types fondamentaux de symétrie d'orientation. Ce sont les 7 systèmes cristallins (ou polyèdres fondamentaux). <sup>[2]</sup>

Un **système cristallin** est un classement des cristaux fondés sur la longueur et la disposition de leurs axes (lignes imaginaires passant par le centre du cristal et coupant les faces), définissant les relations de symétrie de ces derniers.

Les minéraux possédant les mêmes éléments de symétrie sont regroupés par **classe cristalline** (ou classe de symétrie). Une description mathématique de la symétrie du réseau microscopique est nommée groupe d'espace d'un cristal.



### I.1.1. Réseaux de Bravais

La symétrie d'un cristal peut être inférieure à celle de sa maille primitive dans le cas où les groupes d'atomes situés aux sommets de la maille ne présentent pas la même symétrie que la maille. Ainsi, Auguste Bravais distingua quatorze types de réseaux cristallins différents nommés ***réseaux de Bravais***.

Chaque système, ou réseau élémentaire, peut se décliner de quatre manières :

- primitive (notée P) : il y a une particule (ou motif) à chaque sommet ;
- centrée (notée I) : il y a en plus une particule au centre de la maille ;
- à faces centrées (notée F) : il y a en plus une particule au centre de chaque face ;
- à deux faces centrées (notée A, B ou C suivant l'axe concerné) : il y a une particule au centre de deux faces opposées.

La forme primitive du système rhomboédrique peut également être notée R.

### I.1.2. Axe de rotation

On analyse les cristaux au moyen d'éléments de symétrie. Ceci est moins immédiat pour des cristaux qui présentent un développement irrégulier de leurs faces. Mais il faut savoir que dans un cristal l'angle entre 2 faces est constant, quelque soit leur développement relatif. Donc, seule l'orientation des faces importe et l'angle qui existe entre les faces est la seule caractéristique réelle de la symétrie.

Sur des petits cristaux, les minéralogistes mesurent ces angles avec un appareil appelé goniomètre. Des goniomètres utilisent la propriété de réflexion de la lumière sur les faces du cristal (à l'identique de la réflexion de la lumière sur un miroir). Nous pouvons faire ces mêmes analyses sans aucun appareil sur des cristaux suffisamment bien formés.

Les formes de cristaux sont ainsi caractérisées par des axes de rotations d'ordres 2, 3, 4 ou 6 qui sont les seules rotations possibles. On remarque dans chacune de ces formes l'invariabilité des angles formés par les faces.



Les formes qui obéissent à la même symétrie et possèdent de mêmes axes de rotation, appelé ici axes de rotation principaux, appartiennent au même système cristallin. Pour chaque système cristallin, ces axes sont cités sur le tableau ci-dessous (tableau 1). Notons que l'axe de rotation principal caractérise la plus haute symétrie dans l'analyse du cristal. <sup>[9]</sup>

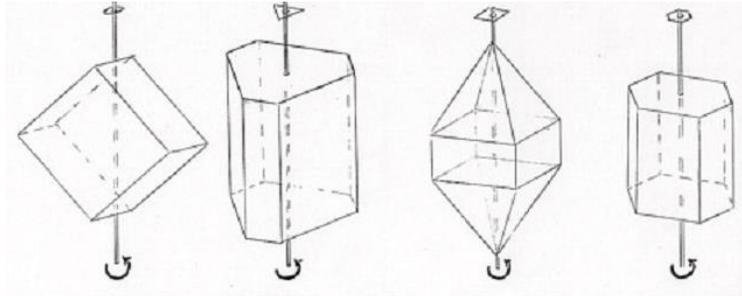


Figure 1: Formes idéales analysées au moyen d'axes de rotation <sup>[9]</sup>

### I.1.3. Particularités cristallines

- **Polymorphisme** : un composé chimique peut cristalliser sous plusieurs formes cristallines selon les conditions de pression et température auxquelles il est soumis. Le carbone ne cristallise sous forme de diamant que dans des conditions de très haute pression et température réunies à l'état naturel dans les gisements de kimberlites. Le plus souvent, dans la croûte terrestre, il se cristallise sous la forme de graphite.
- **Isomorphisme** : lorsque des minéraux ont des compositions chimiques légèrement différentes, mais possèdent la même structure cristalline, on parle de minéraux isomorphes. La famille des grenats est une famille de minéraux isomorphes. C'est également le cas des nombreux carbonates. La calcite est le carbonate de calcium ; dans la smithsonite, du zinc a remplacé le calcium et dans la rhodochrosite, c'est le manganèse qui est présent.
- **Pseudomorphose** : Il arrive que des cristaux présentant l'habitus d'un minéral soient remplis d'une substance chimique qui ne corresponde pas à la formule chimique de ce minéral. C'est qu'un autre minéral s'est substitué à ce premier minéral. On parle alors de pseudomorphose. L'oeil-de-tigre est de la silice qui s'est substituée à une "amiante" tout en conservant sa structure fibreuse. Un autre exemple : les ammonites pyritisées sont formées de pyrite cristallisée dans la coquille d'ammonites lors d'un processus de fossilisation (figure d'illustration à l'annexe 1). <sup>[9]</sup>



I.1.4. Système cristallin

Tableau 1 : Caractéristiques des sept systèmes cristallins <sup>[9]</sup>

Système cristallin	Polyèdre fondamental	Eléments de symétrie caractéristiques	Exemple de minéral
Cubique		4 axes d'ordre 3 3 axes d'ordre 4	diamant spinnelle grenats
Quadratique ou Tétragonal		1 axe principal d'ordre 4	zircon
Hexagonal		1 axe principal d'ordre 6	béryl
Rhomboédrique ou Trigonal		1 axe principal d'ordre 3	quartz corindon tourmaline
Orthorhombique		3 axes d'ordre 2	chrysobéryl topaze péridot
Monoclinique		1 axe d'ordre 2	spodumène orthose
Triclinique		pas d'axes ni plans	labradorite

## I.2. Propriétés d'identification des minéraux

En observant un minéral quelconque, notre attention se trouvera naturellement dirigée sur certains caractères faciles à saisir et propres à frapper les sens. Mais ces dernières ne nous apprendront encore rien de sa nature. Ainsi, outre un test d'observation, un test d'expérimentation est nécessaire afin de confirmer la véritable nature d'un minéral.

Un minéral est caractérisé par quelques propriétés physiques et chimiques. Mais comme le but de ce projet est celui de faciliter l'identification d'un minéral sur terrain, se concentrer sur certains caractères du minéral serait plus pratique.

### I.2.1. Habitus ou forme

La structure interne du minéral détermine son aspect extérieur. Comme il a été mentionné ci-dessus, chaque minéral est construit suivant un schéma d'agencement des atomes bien précis. Cependant il est rare de trouver dans la nature un cristal parfaitement cristallisé. En règle générale, il y a soit des faces planes (cristaux xénomorphes, idiomorphes ou automorphes), soit des agrégats.

Ainsi, un minéral peut être défini par sa forme cristalline dominante qui peut être cubique, prismatique, aciculaire, fibreuse, en tablettes, ... ou par l'agencement d'un agrégat : granuleux, filamenteux, oolithique, dendritique, botryoïdal (ou concrétionné),...

Il est à noter qu'un minéral peut se présenter sous divers habitus suivant son gisement, mais il appartient toujours à un seul et même système cristallin. (Figure d'illustration à l'annexe 1).

### I.2.2. Couleur

Elle fait partie des caractères de détermination les plus importants mais n'est pas toujours absolument fiable. Ainsi, il importe de distinguer les couleurs propres du minéral des couleurs accidentelles qui lui sont communiqués à travers un mélange étranger. Outre, celle-ci peut être différente dans les cassures fraîches et dans les cassures anciennes, qui se ternissent souvent et peuvent donner une idée inexacte de la vraie couleur du minéral.



### I.2.3. Clivage

Le clivage correspond à des plans de faiblesse dans la structure cristalline, le long desquels, un minéral se brisera facilement. Le plan de clivage s'observe en tapant sur le minéral. Dans le cas de certains minéraux tendres, les clivages sont facilement mis en évidence avec la lame d'un couteau.

Il est à noter qu'un minéral ne se brisera jamais selon ses faces cristallines.

### I.2.4. Cassure

La cassure désigne l'aspect de la surface d'un minéral qui, après avoir été soumis à une contrainte, se brise en présentant des surfaces de fractures irrégulières, dans des directions quelconques.

Tous les minéraux présentent des cassures, mais elles peuvent être difficiles à observer lorsque le clivage est facile dans plusieurs directions. De la sorte, la cassure peut être conchoïdale, inégale, rugueuse, terreuse, friable, esquilleuse, ...

### I.2.5. Dureté de Mohs

La dureté se mesure par la faculté que possède un corps d'en rayer un autre. Aussi, une échelle arbitraire de dureté nommée échelle de Mohs a pu être établie. Celle-ci contient 10 degrés, représenté chacun par un minéral. Dans l'absolu elle a été établie de proche en proche un rayant chaque minéral par un autre minéral. Cependant, sur le terrain, certains objets faisant partie de la panoplie du parfait géologue permettent de déterminer la dureté des minéraux rencontrés, ce qui permet par exemple de discriminer la calcite du feldspath. (Tableau d'illustration à l'annexe 2).

### I.2.6. Trait ou trace

L'étude de la couleur de la poudre est un caractère important dans la caractérisation des minéraux. En effet, elle permet notamment de déterminer les minéraux à couleur empruntée (effet de la présence en trace d'atomes à potentiel colorateur) qui ont généralement une poudre blanche



ou à peine colorée. Certains minéraux ont une poudre très caractéristique comme l'hématite  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (noire) qui a une poudre rouge sang ou la pyrite  $\text{FeS}_2$  (jaune d'or) qui laisse une poudre noire verdâtre, de même le graphite (noir) laisse une trace gris métal (crayon à papier) et le molybdénite  $\text{MoS}_2$  laisse une trace verdâtre.

La trace d'un minéral s'obtient, soit en le rayant à l'aide d'une pointe, soit en le frottant sur une plaque de porcelaine. Cependant, ceci dépend beaucoup de la dureté du minéral.

### I.2.7. Eclat

L'éclat des minéraux, c'est l'aspect qu'offre leur surface lorsqu'elle réfléchit la lumière. On distingue trois grandes catégories :

- ***l'éclat métallique*** : caractérisé par un fort pouvoir réflecteur de la surface et une forte absorption de la lumière dans le volume du minéral. C'est l'éclat des métaux natifs, des sulfures, des sulfosels et de quelques oxydes métalliques ;
- ***l'éclat submétallique*** : c'est l'éclat de certains minéraux qui ne réfléchissent pas la totalité de la lumière ;
- ***l'éclat non métallique*** : c'est l'éclat des minéraux plus ou moins transparents, que l'on décrit par des termes comme vitreux (comme le verre), gras (comme si la surface était enduite d'huile ou de graisse), adamantin (qui réfléchit la lumière comme le diamant), résineux (comme la résine), soyeux (comme la soie), nacré (résultat d'une structure fibreuse fine), ...

### I.2.8. Macle

Il s'agit de l'association de cristaux de même composition mettant en commun un élément de symétrie, soit par accollement selon une face définie, soit par interpénétration de cristaux. Dans la nature un cristal ne présentera jamais d'angles rentrants, de ce fait, la présence de tels types d'angles indique que le minéral est maclé. Il peut y avoir des macles simples (association de deux cristaux) ou multiples (plusieurs cristaux). (Exemple d'illustration à l'annexe 2).



### I.2.9. Transparence

C'est la propriété des minéraux à laisser passer la lumière. Un petit test simple permet de déterminer le degré de transparence des minéraux, ainsi on distingue les minéraux :

- **transparents** : permettant de lire une écriture même au travers d'une épaisse couche de minéral. C'est le cas notamment du spath d'Islande (calcite pure), du cristal de roche ou du diamant ;
- **semi-transparents** : l'écriture lue à travers le minéral n'est pas nette. C'est le cas par exemple du quartz rose et de la plupart des émeraudes ;
- **translucides** : la lumière traverse le minéral, même très épais (halite, orthose) ;
- **non-transparents** : à l'état massif le minéral ne laisse pas traverser la lumière, en couche mince il est translucide (amphibole, augite) ;
- **opaques** : quelle que soit son épaisseur, le minéral ne laisse pas passer la lumière (pyrite, magnétite).

Ces classes de transparence s'appliquent sur des minéraux bien cristallisés, idéaux. Dans la réalité, un même type de minéral peut être translucide ou opaque selon sa composition chimique, la qualité de son réseau cristallin ou les tensions externes et internes qu'il a pu subir.

### I.2.10. Densité

La densité est une constante physique qui caractérise un minéral donné. Plusieurs minéraux ont une densité situant autour de  $2.7 \text{ g/cm}^3$ , soit 2.7 fois plus lourd qu'un volume égal d'eau. Cependant les densités peuvent s'échelonner de  $d = 1$  à 2 (sassolite: 1,48 ; carnallite : 1,6 ; sylvinite : 1,98 ; soufre : 2,05 ; gypse : 2,2) à  $d = 21,4$  (platine).

Sur le terrain, il est possible de déterminer approximativement la densité d'un minéral en le soupesant. On distingue ainsi les minéraux légers (densité de 2), les minéraux moyennement lourds (densité de 2 à 4) , les minéraux lourds ( $d = 4$  à 6), ainsi que les minéraux très lourds ( $d > 6$ ).



### I.2.11. Composition chimique

La composition chimique des minéraux obéit aux lois ordinaires de la chimie. La définition de l'espèce minérale se confond avec celle de l'espèce chimique. Elles ne se séparent l'une de l'autre que par l'origine naturelle ou artificielle des produits auxquels elles s'appliquent.

La composition chimique d'un minéral peut être formé par un ou par plusieurs éléments chimiques. Cependant, la majorité des minéraux qui constituent la croûte terrestre est composé uniquement de huit (8) éléments chimiques :

- Oxygène (O) : 46,5 %
  - Silicium (Si) : 28 %
  - Aluminium (Al) : 8 %
  - Fer (Fe) : 5 %
  - Calcium (Ca) : 3,5 %
  - Sodium (Na) : 3 %
  - Potassium (K) : 2,5 %
  - Magnésium (Mg) : 2 %
- } 82,5 % de la croûte terrestre

### I.3. **Classification des minéraux**

La classification des minéraux correspond à une répartition des espèces minérales basées notamment sur la composition chimique des minéraux. En gros, ces derniers sont classés en :

- minéraux non silicatés ;
- minéraux silicatés.

#### I.3.1. Les minéraux non silicatés

Si les roches constituant l'écorce terrestre sont généralement faites à plus de 95 % de silicates, les quelques % restants sont fait de minéraux dits "accessoires" dont l'étude est parfois importante pour expliquer la pétrogenèse de la roche. Ces minéraux présentent parfois un intérêt économique très fort. Outre, parmi les roches sédimentaires et métamorphiques, les roches



carbonatées s'avèrent importantes, sans parler des évaporites, des bauxites, des dépôts phosphatés, ...

Ainsi, les minéraux non silicatés sont loin d'être inutile. Ces derniers sont classés selon le type de groupement chimique caractéristique dans leur composition chimique, et sont groupés en :

1	2	3	4
Éléments (natifs, carbures, nitrures, siliciures, alliages, etc.)	Sulfures et sulfosels (et séléniures, antimoniures, arséniures)	Halogénures (et oxyhalogénures)	Oxydes et hydroxydes
			
Or (Californie)	Pyrite (Espagne)	Halite (Pologne)	Quartz (Mont-Blanc)
5	6	7	8
Carbonates et nitrates	Borates	Sulfates, chromates, molybdates et tungstates (et séléniates, niobates et thiosulfates)	Phosphates, arséniates et vanadates
			
Calcite (Mexique)	Borax (Italie)	Apatite (Mexique)	Gypse (localité inconnue)

Figure 2: Minéraux non silicatés. [4]

### I.3.2. Les minéraux silicatés

Les silicates, près de 600 espèces, constituent avec la silice environ 95% en poids de la totalité des minéraux formant la croûte terrestre et plus ou moins 100 % du manteau, d'où leur extrême importance. Ils se reconnaissent assez facilement : éclat généralement vitreux, transparents

à translucides, forte dureté, densité moyenne (de 2,6 à 3,3), poussière incolore à grise même pour des silicates fortement colorés.

Par définition, les silicates sont des minéraux dont le motif cristallin est un tétraèdre  $(SiO_4)^{4-}$  dont le centre est occupé par un ion  $Si^{4+}$  et chacun de ses sommets portent un ion  $O^{2-}$ . Ces groupes tétraèdres peuvent être isolés ou assemblés de manières différentes. Selon leur modalité d'assemblage, on distingue les :



Figure 3: Minéraux silicatés. [4]

## CHAPITRE II. LA GEMMOLOGIE

La gemmologie peut être considérée comme une discipline de la minéralogie, débordant plus ou moins le domaine de la science pure pour toucher à celui de l'art et du commerce. C'est la science qui étudie les gemmes, leur identification, leur provenance, et leur qualité. [6]

Une gemme est définie comme un minéral qui, grâce à des processus de taille et de polissage, atteint une beauté suffisante pour être utilisé en joaillerie, en orfèvrerie ou en ornementation. [7]

## II.1. Critères définissant une gemme

Alors qu'il existe près de 5000 espèces minérales, il n'existe qu'une septantaine de gemmes, à cause des critères esthétiques rigoureux qui les définissent. Parmi ces gemmes, une quinzaine seulement sont des gemmes de première importance. Pour qu'une "pierre" soit considérée comme gemme, elle doit répondre à quatre critères de qualité : la beauté, la rareté, la durabilité et son attrait commercial.

### II.1.1. Beauté

La beauté est le premier critère qui intervient dans la définition d'une gemme. C'est la combinaison de la qualité qui donne une sensation agréable à la vue, notamment la couleur, la symétrie et l'apparence de la surface (lustre), la transparence. <sup>[8]</sup>

### II.1.2. Rareté

La rareté qui confère à la gemme la qualité d'objet convoité, donc coûteux, et en fait un symbole de richesse et de puissance. Des gemmes avec des attributs rares (couleur, poids, forme, inclusion, ...), difficile à trouver ou connu seulement en des endroits rares ou difficile d'accès ont de la valeur. <sup>[8][9]</sup>

### II.1.3. Durabilité

Ce critère de durabilité est de première importance, car les gemmes doivent pouvoir résister aux agressions mécaniques (rayures, cassures) et chimiques (transpiration) qu'elles vont endurer lorsqu'elles seront portées. La durabilité d'une gemme est donc principalement gouvernée par ses propriétés physiques, comme par exemple sa dureté, sa ténacité, sa fragilité, la présence de plans de débitage ou de plans de clivage. <sup>[7]</sup>

### II.1.4. Attrait commercial

C'est l'intérêt ou désire susciter auprès des consommateurs : l'acceptabilité, la désirabilité, la mode, le design. L'intérêt suscité est fortement influencé par la mode et la culture. <sup>[8]</sup>



## II.2. Différents types de gemmes

Si l'on considère la définition stricte d'une gemme, on aboutit à une série de minéraux que l'on peut subdiviser en deux catégories, en fonction de leur rareté. On distingue ainsi :

- les **pierres précieuses**, dont la valeur marchande est très élevée et qui comprennent quatre gemmes : le diamant, le rubis, le saphir et l'émeraude ;
- les **pierres fines** qui regroupent les gemmes de moindre valeur. Les plus courantes sont le spinelle, le chrysobéryl, la turquoise, le péridot, les grenats, le zircon, la topaze, les béryls, les tourmalines, la jadéite, les différentes variétés de quartz, et l'opale. <sup>[7]</sup>

## II.3. Les propriétés des minéraux gemmes

L'identification d'un minéral ne se fait pas de manière aussi simple. Pour analyser les propriétés physiques des minéraux, les minéralogistes ont recours à des expériences de laboratoire et à un appareillage de haute précision exigeant une manipulation délicate. Il existe toutefois des moyens rapides de détermination, qui donnent suffisamment d'information et permettent l'identification de la substance. Le gemmologue utilise ces méthodes dans le but de déterminer des bruts. Pour l'analyse des pierres taillées, il s'aide d'appareils relativement simples qui donnent une mesure précise des caractères optiques de la gemme ; il procède également à une mesure de la densité. Les minéraux présentent encore bien d'autres propriétés telles que conductivités électrique ou thermique, dont l'analyse entre dans le cadre de laboratoires spécialisés

Les propriétés physiques qui servent directement à la détermination des gemmes sont déjà abordés dans le chapitre I.3, de ce fait, seule les caractères optiques des gemmes seront développés dans le présent chapitre.

On a observé les phénomènes optiques dès l'Antiquité, mais ce n'est que tardivement, au XVIIIe siècle que des naturalistes ont réussi à définir les propriétés optiques de la matière, et il aura fallu attendre l'aube du XXe siècle pour qu'une explication scientifique de la lumière soit formulée. Il est important pour les gemmologues d'avoir quelques notions de ce chapitre de la physique qu'est l'optique cristalline. La construction des appareils d'identification utilisés en gemmologie se base sur des principes physiques telles que la réfraction, la réflexion et la polarisation



de la lumière ainsi que l'absorption et la diffusion et d'autres encore... C'est par ces appareils, que le gemmologue observe les caractères optiques des gemmes et effectue des mesures. Et aussi, n'est-ce pas les jeux de lumière qui font la beauté des pierres précieuses ? <sup>[9]</sup>

### II.3.1. La couleur des gemmes

La couleur des gemmes est une de leurs caractéristiques les plus importantes. Cette couleur est d'ailleurs le critère majeur qui permet d'identifier visuellement les gemmes. Mais quelles sont exactement les facteurs qui régissent la couleur des minéraux ? Les détails seront présentés en annexe 3.

### II.3.2. Indice de réfraction

#### II.3.2.1. La réfraction

Quand la lumière qui se propage dans l'air entre dans un matériau gemme, sa vitesse est réduite. Le changement brusque de la vitesse de la lumière est accompagné d'un changement de sa direction quand il pénètre le matériau : le rayon de la lumière est dévié. Cet effet de déviation est appelé réfraction. <sup>[8]</sup>

#### II.3.2.2. Indice de réfraction

Chaque matériau possède sa densité optique. Plus le ralentissement de la vitesse de la lumière est prononcé, plus la densité optique du matériau est élevée. C'est pourquoi la lumière est réfractée à un angle spécifique quand elle pénètre ou quitte un matériau bien défini.

Pour chaque substance, il existe une relation simple entre la lumière incidente et sa réfraction. Il est résumé dans la loi de réfraction et est donné par l'indice de réfraction (IR).

$$IR = \frac{\text{vitesse de la lumière dans l'air}}{\text{vitesse de la lumière dans la gemme}} = \frac{\sin i}{\sin r}$$

Où  $i$  : angle d'incidence,  $r$  : angle de réfraction, IR : indice de réfraction



L'indice de réfraction se calcule par un rapport, il n'a pas d'unité et sa valeur est toujours supérieure à 1. On attribue, par convention,  $n = 1.0$  à l'air ou au vide. C'est un caractère optique indispensable à l'identification des gemmes du fait que la plupart des gemmes possède un IR caractéristique ou qui se situe dans une fourchette déterminée.

La **biréfringence** est l'écart numérique maximal entre les deux indices de réfraction d'un matériau anisotrope. <sup>[8]</sup>

### II.3.3. Propriétés optiques <sup>[8]</sup>

Les matériaux qui laissent passer les rayons lumineux, que ce soit transparents ou translucides, peuvent être divisés selon leur réaction à la lumière en deux groupes : isotropes ou anisotropes.

#### II.3.3.1. Matériaux optiquement isotropes

Ce sont les matériaux possédant les mêmes propriétés optiques internes (IR, vitesse de vibration) dans toutes les directions. Dans un corps isotrope, la lumière est réfractée ou déviée mais non polarisée. Elle continue à vibrer dans toutes les directions perpendiculairement à la direction de propagation.

Ces matériaux possèdent un indice de réfraction unique. Ils sont donc **uniréfringents** (ou **monoréfringents**). Les cristaux cubiques (diamant, grenat, spinelle, fluorite) et les substances amorphes c'est-à-dire non cristallines (gaz, liquide, les verres et plastiques naturels ou synthétiques, ambre, opale) en sont des exemples.

#### II.3.3.2. Matériaux optiquement anisotropes

Les propriétés optiques internes sont différentes selon la direction de la lumière dans le matériau, (c'est-à-dire deux IR, deux vitesses de vibrations, deux directions). Le rayon de lumière pénétrant une substance anisotrope sera divisé en deux rayons réfractés et polarisés dans deux plans perpendiculaires l'un par rapport à l'autre.



Ces matériaux ont deux valeurs d'indice de réfraction. Ils sont alors appelés **biréfringents**. Ils regroupent les cristaux appartenant aux autres systèmes cristallins (quadratique, rhomboédrique, hexagonal, orthorhombique, monoclinique et triclinique).

La **double réfraction** est l'effet de dédoublement optique qui est causé par la séparation de la lumière en deux composantes différentes.

### II.3.3.3. Axe optique

Un axe optique c'est une direction dans une structure cristalline anisotrope parallèle à laquelle se produit une simple réfraction.

Suivant le système cristallin, les matériaux anisotropes possèdent soit un axe optique (uniaxe), soit deux axes optiques (biaxe).

- **Matériaux optiquement uniaxes** : substances du système quadratique, hexagonal, rhomboédrique. La lumière se propageant dans une direction autre que l'axe optique va se polariser en deux plans de polarisation. Ces matériaux possèdent deux valeurs d'indice de réfraction ( $\omega$ ,  $\varepsilon$ ).
- **Matériaux optiquement biaxes** : substances du système orthorhombique, triclinique et monoclinique. Ces dernières possèdent 2 axes optiques orientés (normalement non parallèle à aucun axe cristallographique) à un angle nommé  $2V$ , et 3 principales directions de vibrations avec 3 valeurs d'indice de réfraction ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ).

### II.3.4. Pléochroïsme <sup>[13]</sup>

Ce mot provient de deux mots grecs qui signifient « plusieurs couleurs ». Nous savons que les cristaux biréfringents ont la propriété de séparer les rayons lumineux qui les éclairent en les polarisant, les directions de vibrations étant perpendiculaires entre elles. De plus, ces rayons sont déviés et ralentis dans la matière.

Etant ralentis, ils ont donc des longueurs d'ondes différentes dans certaines directions du cristal, c'est-à-dire une couleur différente puisqu'à chaque longueur d'onde dans le visible



correspond une couleur précise. On parle d'absorption sélective de la lumière. Elle signifie que certaines longueurs d'onde seront plus absorbées que d'autres dans chacune de ces directions de vibration. Ainsi, la couleur est portée par ces différents plans de polarisation.

Le pléochroïsme ne se voit pas dans la direction de l'axe optique. Les cristaux uniaxes sont dits **dichroïques** : ils ne montreront que deux teintes dans les deux directions principales de vibration. Par exemple, les saphirs bleus montrent des teintes de pléochroïsme bleue et bleue claire.

Les cristaux biaxes sont dits **trichroïques** : ils montrent trois couleurs dans les trois principales directions de vibration. Par exemple, l'alexandrite montre des teintes de pléochroïsme rouge, orange et verte.

Il est important de noter que ce phénomène peut ne pas être évident à observer, et même parfois pas observable du tout, dans les matériaux anisotropes. Et pour certains cristaux, il sera observable à l'œil nu comme par exemple, l'andalousite, la iolite, la tanzanite, la tourmaline.

On qualifie toujours le pléochroïsme de prononcé, modéré ou faible, et l'on indique toujours les couleurs observées.

Tableau 2 : Quelques exemples de couleurs de pléochroïsme <sup>[13]</sup>

Gemmes	Couleurs de pléochroïsme
Andalousite ( <i>système orthorhombique – biaxe</i> )	Vert-brun, rouge, jaune
Iolite ( <i>système orthorhombique – biaxe</i> )	Bleu, violet, jaune
Rubis ( <i>système rhomboédrique – uniaxe</i> )	Rouge orangé, rouge violacé
Tanzanite ( <i>système orthorhombique – biaxe</i> )	Bleu, rouge violacé, jaune verdâtre
Tourmaline ( <i>système rhomboédrique – uniaxe</i> )	Deux tons différents en fonction de la couleur de la pierre



## II.3.5. Phénomènes optiques et éclat

### II.3.5.1. Réflexion de la lumière <sup>[9]</sup>

Au contact entre deux milieux, le rayon lumineux est non seulement réfléchi, mais également réfracté selon les lois de la réflexion et de la réfraction.

Notons que si le rayon touche à la perpendiculaire la surface entre deux milieux, il va être réfracté dans le milieu plus dense sans être dévié et réfléchi dans la même direction que le rayon incident (cas particulier).

Le rayon est entièrement ou seulement partiellement réfléchi en fonction de la nature des milieux traversés. L'intensité des rayons réfractés et réfléchis sera variable de cas en cas et peut dépendre de leurs angles d'incidence.

### II.3.5.2. Eclat

C'est l'effet causé par la réflexion de la lumière à la surface d'une gemme. L'éclat d'une pierre précieuse est une appréciation subjective, mais elle dépend aussi de son pouvoir réflecteur, de son degré d'opacité et de la manière dont elle diffuse la lumière. Le pouvoir réflecteur est la proportion de lumière réfléchie par rapport à la quantité de lumière reçue.

Pour les minéraux transparents, le pouvoir réflecteur est toujours assez faible et ne dépend que de l'indice de réfraction. La nature de la surface du minéral ou la présence d'inclusions microscopiques peut modifier l'éclat. Les gemmes dont l'éclat est vif sont dotées d'un indice de réfraction élevée et habituellement mais pas systématiquement, il s'agit d'une gemme dont la dureté est élevée.

L'éclat maximal dépend de la qualité d polissage et du degré d'usure. Il existe toute une série de qualificatifs pour décrire l'éclat : résineux, laiteux, opalescent, terreux, soyeux, terne, etc...

Certains minéraux ont des indices si élevés qu'ils ont une apparence opaque. Les lois qui régissent le pouvoir réflecteur des minéraux opaques sont plus complexes. Nous ne retiendrons que l'appréciation de "métallique": l'hématite, d'indice  $n = 3$ , possède un éclat métallique.



*Tableau 3 : Appréciation de l'éclat des minéraux transparents*

<b>Eclat</b>	<b>Pouvoir réflecteur</b>	<b>Indice de réfraction</b>	<b>Exemple</b>
Gras ou résineux	<5%	1,3 à 1,5	Fluorine
Vitreux	5 – 10%	1,5 à 1,8	Quartz
Subadamantin	10 – 15%	1,8 à 2,2	Zircon
Adamantin	>15%	>2,2	Diamant

### II.3.5.3. Phénomènes optiques <sup>[14]</sup>

Ils sont causés par la réflexion de la lumière sous des éléments situés sous la surface de la gemme. Les détails sont consultables en annexe 5.

### II.3.6. Dispersion et feu

Il n'existe aucune frontière entre les couleurs. Les 6 couleurs spectrales majeures sont comprises dans les bandes de longueurs d'ondes suivantes :

Rouge	700 – 610 nm
Orange	610 – 590 nm
Jaune	590 – 560 nm
Vert	560 – 490 nm
Bleu	490 – 450 nm
Violet	450 – 400 nm

#### II.3.6.1. Dispersion

Lorsque la lumière blanche pénètre dans un matériau transparent selon un angle par rapport à sa surface, un spectre de dispersion se produit. Les longueurs d'ondes de la lumière blanche les plus longues sont moins réfractées que les longueurs d'ondes plus courtes, de telle sorte que les longueurs d'ondes se séparent de façon progressive. Elles sont dispersées selon la longueur d'onde.



### II.3.6.2. Feu

Dans les pierres facettées, lorsque la lumière passe à travers des facettes inclinées, la dispersion peut produire des scintillements de couleur appelés « feux ». Le diamant, zircon et grenat démantôide sont connus pour leur feu prononcé.

### II.3.7. Luminescence <sup>[13]</sup>

Les gemmologues utilisent aussi des sources de rayonnements invisibles pour l'œil humain pour aider à l'identification des gemmes.

Le terme luminescence décrit la transformation d'énergie par une substance. C'est un terme générique qui englobe plusieurs phénomènes. Par exemple, la bioluminescence, la chimiluminescence, la triboluminescence, la thermoluminescence et la photoluminescence.

**Fluorescence** (photoluminescence) : c'est un type de luminescence qui nous intéresse particulièrement en gemmologie.

Elle désigne la propriété d'une gemme à émettre de la lumière lorsqu'elle est exposée à des radiations. Elle peut dans certains cas permettre de différencier une gemme naturelle d'une gemme traitée, ou même aider à distinguer les perles fines des perles de culture. Dans le diamant, la fluorescence est considérée comme un critère de qualité important car elle peut atténuer sur son éclat.

On éclaire une gemme par un rayonnement particulier comme des rayons ultra-violetts par exemple.

A l'état normal, un atome est dans un état stable. En absorbant de l'énergie véhiculée par des ondes électromagnétiques, certains électrons quittent leur orbitale pour passer à une orbitale plus énergétique, créant ainsi un état instable pour l'atome. Pour retrouver une configuration électronique stable, l'électron devra libérer, restituer l'énergie qu'il aura puisé. Comme l'électron ne peut émettre plus d'énergie qu'il en a absorbée, l'émission d'énergie sera égale ou inférieure à celle acquise. Ceci implique forcément une réémission dans un domaine d'énergie inférieur à l'excitatrice. La



restitution de l'énergie se fera dans la bande visible du spectre électromagnétique, soit sous forme de fluorescence, soit sous forme de phosphorescence. C'est le facteur temps qui distingue les deux évènements : la fluorescence se produit aussi longtemps que l'excitatrice fonctionne, alors que la phosphorescence se produit après l'interruption de l'excitatrice.

En gemmologie, on utilise des sources d'UV Longs de 365 nm et d'UV Courts de 254 nm. Pour décrire convenablement la fluorescence d'une gemme, il faut qualifier son intensité de faible, modérée ou forte, puis décrire les couleurs de fluorescence aux UVL puis aux UVC. Les gemmes contenant du fer ne fluorescent pas. Le fer est un inhibiteur de la luminescence.

### II.3.8. Inclusions <sup>[13]</sup>

Du plus petit grain de sable aux plus spectaculaires spécimens exposés dans les musées, toutes les pierres jusqu'à leurs plus infimes fragments recèlent de précieuses informations sur leur origine. Elles racontent l'Histoire de la formation de la Terre. C'est au moyen du microscope que cette histoire se révèle.

Le monde des inclusions se dévoile : inclusions solides sous forme de petits cristaux, des bulles de gaz transportées par des courants de convection thermique et piégées dans la matière ou dans de petits volumes de liquides.

Ces inclusions solides et fluides, accompagnées de caractéristiques typiques du paysage observé dans un cristal, telles que les clivages, fractures, zones de croissance et de tension, donnent des indications sur l'histoire de la vie d'une pierre précieuse.

Dans de nombreux cas, les inclusions de certaines gemmes provenant d'endroits bien définis, sont dites « caractéristiques » pour tel type de pierre et pour telle localité. Les gemmes, qu'elles soient naturelles ou synthétiques, peuvent souvent être identifiées par leurs inclusions caractéristiques.

Depuis l'apparition des produits synthétiques sur le marché des pierres précieuses, l'étude des inclusions a joué un rôle majeur dans le domaine de l'identification. D'autant plus que les méthodes de synthèse ne cessent de s'améliorer, que des nouveaux traitements sont appliqués aux

pierres, et que les imitations se font de plus en plus convaincantes. Une parfaite connaissance des inclusions s'avère capitale pour tous ceux qui interviennent dans le monde de la bijouterie.

### II.3.9. Autres propriétés d'une gemme <sup>[8]</sup>

- ***Ténacité***

Cette propriété qu'il ne faut pas confondre avec la dureté, est la résistance au choc ou à la traction. Autrement dit, c'est la capacité des matériaux gemmes de résister à la formation d'un clivage ou d'une fracture. <sup>[12]</sup>

Certains matériaux sont naturellement plus tenaces que les autres. Des matériaux gemmes polycristallins tels que l'agate, le jade néphrite et la jadéite en sont des bons exemples. La ténacité dépend à la fois des liaisons et de l'agencement structural au niveau atomique et de la structure cristalline dans son ensemble.

- ***Stabilité***

La stabilité est la capacité d'un matériau de résister aux changements d'ordre physique ou chimique provoqués par la lumière ; la chaleur ou les agents chimiques

### II.3.10. Formes de la taille

Afin de mettre les gemmes en valeur, il est nécessaire de les tailler ou de les polir. Une méthode simple consiste à rouler les fragments de minéraux dans un tonneau rotatif contenant de l'abrasif fin. Après quelques heures, on obtient ainsi des fragments de gemmes polies. Une autre technique permet d'obtenir un cabochon, qui est un fragment de gemme en forme de dôme, dont la partie inférieure peut être plane ou de forme courbée, conférant au cabochon un aspect lenticulaire.

Alors que les cabochons sont plutôt utilisés pour les gemmes non transparentes, il est plus avantageux de tailler les gemmes en leur conférant de nombreuses facettes, lorsqu'elles sont transparentes. En effet, ces facettes vont favoriser la réfraction des faisceaux lumineux



dans de nombreuses directions, intensifiant ainsi l'éclat de la gemme. Dans le cas du diamant, les faisceaux réfractés subissent également une dispersion ; ces rayons présentent des teintes bleues ou rouges, conférant à la gemme son feu caractéristique. (Figures d'illustration à l'annexe 4).

Finalement, la *limpidité* est le dernier critère important, permettant d'évaluer la qualité d'une gemme. La limpidité dépend du nombre d'inclusions présents dans la gemme, et une échelle a été élaborée afin de qualifier le plus précisément possible le degré de limpidité d'une pierre. [7]

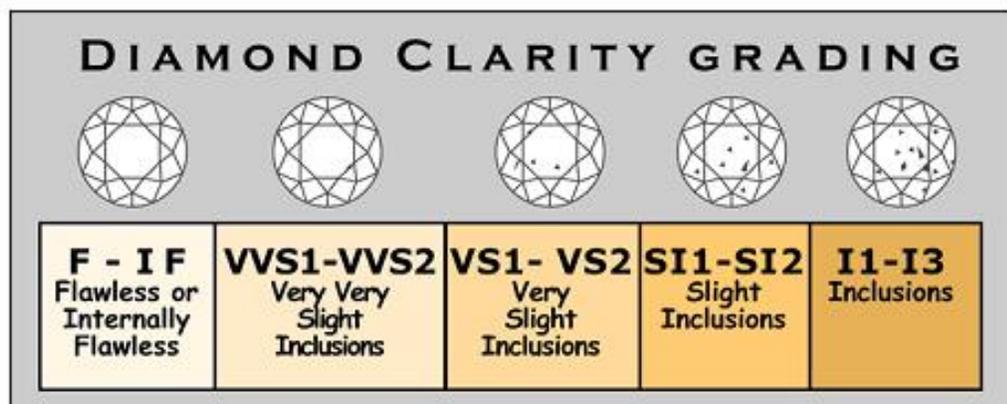


Figure 4: Diamond clarity grading [7]

## II.4. Traitement [8][24]

C'est un procédé par lequel on améliore et modifie artificiellement l'apparence et les caractéristiques d'un matériau gemme.

Les gemmes et les substances organiques sont traitées pour améliorer leurs couleurs et / ou leurs apparences par des moyens autre que la tailles et le polissage.

### II.4.1. Revêtement par peinture, paillon et teinture

C'est un traitement de surface qui consiste à appliquer une couche de couleur sur la pierre pour l'améliorer ou la changer. La distribution de la couleur n'est pas homogène, elle dépend de la

porosité du matériau, elle se concentre dans les fissures ou les veines. La plupart des teintures organiques laisse une marque sur un coton imbibé d'acétone (mais test destructeur).

#### II.4.2. Imprégnation et remplissage

On utilise l'huile ou d'autre substance stabilisante pour améliorer l'apparence ou la résistance des gemmes lorsqu'elles sont poreuses ou fissurées.

Le remplissage des fractures fait intervenir l'introduction de liquides, de semi solide, de solides (huiles, résines, cires, polymères, verres) dans les fractures affleurant à la surface de la pierre pour réduire leur visibilité et par conséquent améliorer la transparence et la clarté. Il est important de noter que ce traitement peut être appliqué à quasiment toutes les gemmes.

L'imprégnation a plusieurs aspects. Le premier intervient avec les matériaux à structures poreuses qui sont remplis avec des résines, cires, polymères pour en améliorer la durabilité, le lustre, la transparence ou la couleur. Le second aspect de ce traitement consiste à introduire une substance colorée dans une gemme qui a elle aussi une structure poreuse (agate, turquoise) ou des fractures altérant la surface (quartz, corindons), pour en modifier la couleur apparente.

#### II.4.3. Chauffage

Un traitement par chauffage peut produire ou éliminer une couleur en modifiant la chimie des éléments de transition ou par déshydratation. Il peut également servir à produire ou détruire les rutiles dans le corindon

#### II.4.4. Diffusion

Etroitement liée au traitement thermique, et le plus souvent appliquée aux saphirs, le traitement dit "par diffusion" vise à faire diffuser, sous l'effet de hautes températures, des ions chromogènes à la surface d'une gemme taillées, par exemple diffuser des ions Titane et/ou Fer sur un saphir incolore pour le rendre bleu. En effet la couleur est artificiellement produite sur une très faible profondeur de la surface de la gemme, et cette dernière retrouvera sa couleur centrale si elle



est repolie ou retaillée. De plus, les pierres traitées par diffusion de surface montrent des concentrations de couleur sur les arrêtes des facettes et les fissures qui affleurent à la surface.

Quand le mouvement d'atomes s'effectue seulement à la surface il est référencé comme diffusion. Si le mouvement s'effectue dans le corps de la pierre que ce soit de façon peu profonde ou dans tout le volume de la gemme il est nommé « bulk diffusion » ou « lattice diffusion », respectivement et grossièrement traductible par « diffusion en profondeur » ou « diffusion dans la maille cristalline ». Il est important de noter à ce stade que le terme historique et général de « diffusion de surface » est incorrect en gemmologie. Beaucoup d'éléments peuvent être diffusés dans une gemme depuis une source extérieure pour y produire une couleur ou un effet d'astérisme comme le Béryllium (Be) ou des éléments plus bas de la classification périodique comme le titane (Ti) ou le chrome (Cr).

#### II.4.5. Irradiation et réchauffage

La couleur de beaucoup de gemmes peut être modifiée par exposition à des formes variées de radiations comme les électrons, rayons gamma, neutrons. Les radiations peuvent causer des défauts dans la structure atomique du cristal qui seront des centres de couleurs. La coloration résultante pourra être peu profonde ou dans tout le volume de la pierre et dans certains cas pourra être instable à la chaleur et/ou à la lumière.

Voyons sommairement les différents types de rayonnements venant d'un atome radioactif :

- alpha : émission de noyaux d'hélium peu énergétiques. (ne traversent pas une feuille de papier) ;
- beta: émission d'électrons (-) ou de positons (+) plus énergétiques qu'alpha mais que l'on peut encore facilement stopper. (Ne traversent pas le verre) ;
- gamma: émission de photons (rayonnement électromagnétique) de très grande énergie et le plus difficile à arrêter!(peu traverser le plomb).



#### II.4.6. Traitement au laser

Les diamants sont souvent traités au laser pour diminuer l'impact visuel des inclusions foncées. On perce un trou très fin à l'aide d'un rayon laser qui se poursuit à l'intérieur du diamant, en un canal fin de 0,002 mm de diamètre jusqu'à ce qu'il atteigne les inclusions.

Les inclusions peuvent être brûlées par le laser ou éliminées à l'acide. Le trou peut être ensuite rempli de verre ou de l'époxy. Cependant, ces trous sont visibles à la loupe 10x comme des points noirs.

#### II.4.7. Traitement chimique et blanchissement

Ce traitement met en œuvre l'utilisation de produits chimiques pour éclaircir ou blanchir la couleur de certains matériaux et enlever une coloration non désirée. Les produits en question peuvent être des oxydants (eau oxygénée), réducteurs, acides (chlorhydrique, sulfurique, perchlorique, etc), bases (potasse, soude, etc.), solvants. Ils sont choisis en fonction de la matière à éclaircir / blanchir.

Typiquement cette forme d'amélioration est non détectable. Malgré tout il est communément appliqué sur beaucoup de matériaux comme le corail, l'ivoire, le corozo, le jade et les perles. Une exception à cette règle générale est le jade jadéite où les effets du processus de blanchissement sur la structure poreuse peuvent être détectés par une observation sous grossissement.

#### II.4.8. Enrobage

Ce traitement a une multitude d'effets désirés en fonction de la matière sur laquelle il est appliqué. Ceci inclut l'application de :

- substances colorées sur une partie ou la totalité de la surface de la pierre pour induire ou modifier la couleur et/ou l'apparence ;
- substances métalliques pour produire une couleur iridescente à la surface ;
- l'enrobage avec des résines, des polymères, plastiques, pour améliorer le lustre et/ou la stabilité de la matière ainsi enrobée.

L'enrobage est le plus souvent détectable avec une observation sous grossissement optique (binoculaire), par la présence d'indices comme les rayures, l'usure ou la disparition de l'enrobage à la jonction des facettes, de petites bulles emprisonnées par l'enrobant. L'enrobage métallique/iridescent est facilement reconnaissable car l'apparence qu'il donne n'a pas lieu naturellement.

## II.5. Instruments <sup>[13]</sup>

Les instruments que le gemmologue utilise permettent l'identification de nombreuses gemmes. Ils permettent dans certains cas de dire si la gemme est synthétique ou naturelle, ou encore de donner une appréciation de sa qualité, et parfois de sa valeur. Lorsque le résultat de son analyse laisse un doute, le gemmologue s'adresse à un laboratoire où des spécialistes, à l'aide d'appareils scientifiques, effectueront une analyse détaillée de la gemme, de sa composition chimique, minéralogique et cristallographique. Les détails sont consultables en annexe 8.

## **CHAPITRE III. LES TERRES RARES**

Les terres rares ? Pour de nombreuses personnes, ce terme n'évoque rien. Pourtant, elles font partie de notre quotidien à tous ! Présentes dans de nombreuses applications telles que les téléphones portables, les ordinateurs, les téléviseurs à écran plat, les voitures hybrides ou les ampoules basse consommation, elles sont parfois indispensables à leur existence même.

Les terres rares ne sont pas de la terre, mais des métaux ; et rares, elles ne le sont pas. À l'échelle mondiale, les concentrations dans la croûte terrestre de certaines terres rares, telles que le cérium ou encore l'yttrium, sont supérieures à celles d'autres métaux comme le cuivre ou le cobalt. La vraie rareté des ETR s'explique par leur dispersion. Par ailleurs, la présence dans une majorité des cas d'éléments radioactifs tels que le thorium dans le gisement, et la difficulté à séparer les différentes terres rares réunies à l'intérieur de la roche restent problématiques.

Depuis la fin du XXe siècle, les métaux stratégiques ont été défini de manière générale comme des métaux essentiels au progrès, à la technologie moderne et à l'industrie, mais susceptibles



de pénurie ou de difficultés d’approvisionnement. En d’autres termes, ce sont des métaux non-substituables, rares. C’est pourquoi leur approvisionnement est actuellement limité. Les terres rares en font partie. [22]

### III.1. Classification des éléments de terres rares

Les éléments de terres rares sont souvent subdivisés en deux sous-groupes selon leur masse atomique: d’un côté les terres rares légères, aussi appelées terres cériques, qui comprennent les éléments allant du lanthane à l’europium, et de l’autre les terres rares lourdes, dites aussi terres yttriques, qui comprennent les autres lanthanides, du gadolinium au lutétium, ainsi que l’yttrium.

*Tableau 4: Classification des éléments de terres rares [29]*

Numéro atomique	Nom	Symbole	TRLE / TRLO
57	Lanthane	La	TRLE
58	Cérium	Ce	TRLE
59	Praséodyme	Pr	TRLE
60	Néodyme	Nd	TRLE
61	Prométhium	Pm	TRLE
62	Samarium	Sm	TRLE
63	Europium	Eu	TRLE
64	Gadolinium	Gd	TRLO
65	Terbium	Tb	TRLO
66	Dysprosium	Dy	TRLO
67	Holmium	Ho	TRLO
68	Erbium	Er	TRLO
69	Thulium	Tm	TRLO
70	Ytterbium	Yb	TRLO
71	Lutécium	Lu	TRLO
39	Yttrium	Y	
21	Scandium	Sc	

Source : Secrétariat de la CNUCED d’après le British Geological Survey

Le scandium n’est, quant à lui, généralement inclus dans aucune de ces deux catégories. Cette distinction est importante notamment car chaque catégorie possède des niveaux d’utilisation et de demande différents. Les terres rares légères sont ainsi plus abondantes que les terres rares lourdes.



Dans la mine, ces éléments sont trouvés à faible concentration sous forme d'oxydes. On trouve toujours des terres rares lourdes dans les gisements de terres rares légères et réciproquement. [17] [18]

### III.2. Propriétés

Les différents ETR possèdent des propriétés très voisines les unes des autres. En effet, leur structure électronique est identique en ce qui concerne leurs couches externes d'électrons, ce qui leur confère des propriétés chimiques très proches. Cependant, chaque élément diffère du précédent en ceci qu'il possède un électron supplémentaire dans sa couche profonde d'électrons. Il s'agit là d'une propriété tout à fait spécifique à ces éléments : cette propriété est à l'origine du caractère irremplaçable des terres rares dans nombre de leurs applications. [30]

*Tableau 5: Structures électroniques des éléments de terres rares [19]*

Elément chimique	Nom	Structure électronique
21Sc	Scandium	[ Ar ] 3d1 5s2
39Y	Yttrium	[ Kr ] 4d1 5s2
57La	Lanthane	[ Xe ] 6s2 5d1
58Ce	Cérium	[ Xe ] 6s2 5d1 4f1
59Pr	Praséodyme	[ Xe ] 6s2 4f3
60Nd	Néodyme	[ Xe ] 6s2 4f4
61Pm	Prométhéum	[ Xe ] 6s2 4f5
62Sm	Samarium	[ Xe ] 6s2 4f6
63Eu	Europium	[ Xe ] 6s2 4f7
64Gd	Gadolinium	[ Xe ] 6s2 5d1 4f7
65Tb	Terbium	[ Xe ] 6s2 4f9
66Dy	Dysprosium	[ Xe ] 6s2 4f10
67Ho	Holmium	[ Xe ] 6s2 4f11
68Er	Erbium	[ Xe ] 6s2 4f12
69Tm	Thullium	[ Xe ] 6s2 4f13
70Yb	Ytterbium	[ Xe ] 6s2 4f14
71Lu	Lutécium	[ Xe ] 4f14 5d1 6s2



La configuration des électrons dans la structure atomique confère donc aux terres rares des propriétés particulièrement intéressantes, dont les principales sont leurs propriétés électroniques, optiques, magnétiques ou encore catalytiques.<sup>[32]</sup> Ces propriétés physiques et chimiques uniques les rendent indispensables au fonctionnement d'une gamme sans cesse croissante d'applications. Bien qu'utilisées en très petites quantités, elles améliorent considérablement la performance des produits dans lesquels elles sont présentes et sont bien souvent essentielles à leur existence même.<sup>[33]</sup> Leurs propriétés rendent également possible la miniaturisation<sup>[34]</sup>, enjeu essentiel dans un monde où l'infiniment petit règne en maître. Actuellement, il n'y a pas ou peu d'éléments qui peuvent se substituer aux terres rares et délivrer les mêmes performances.

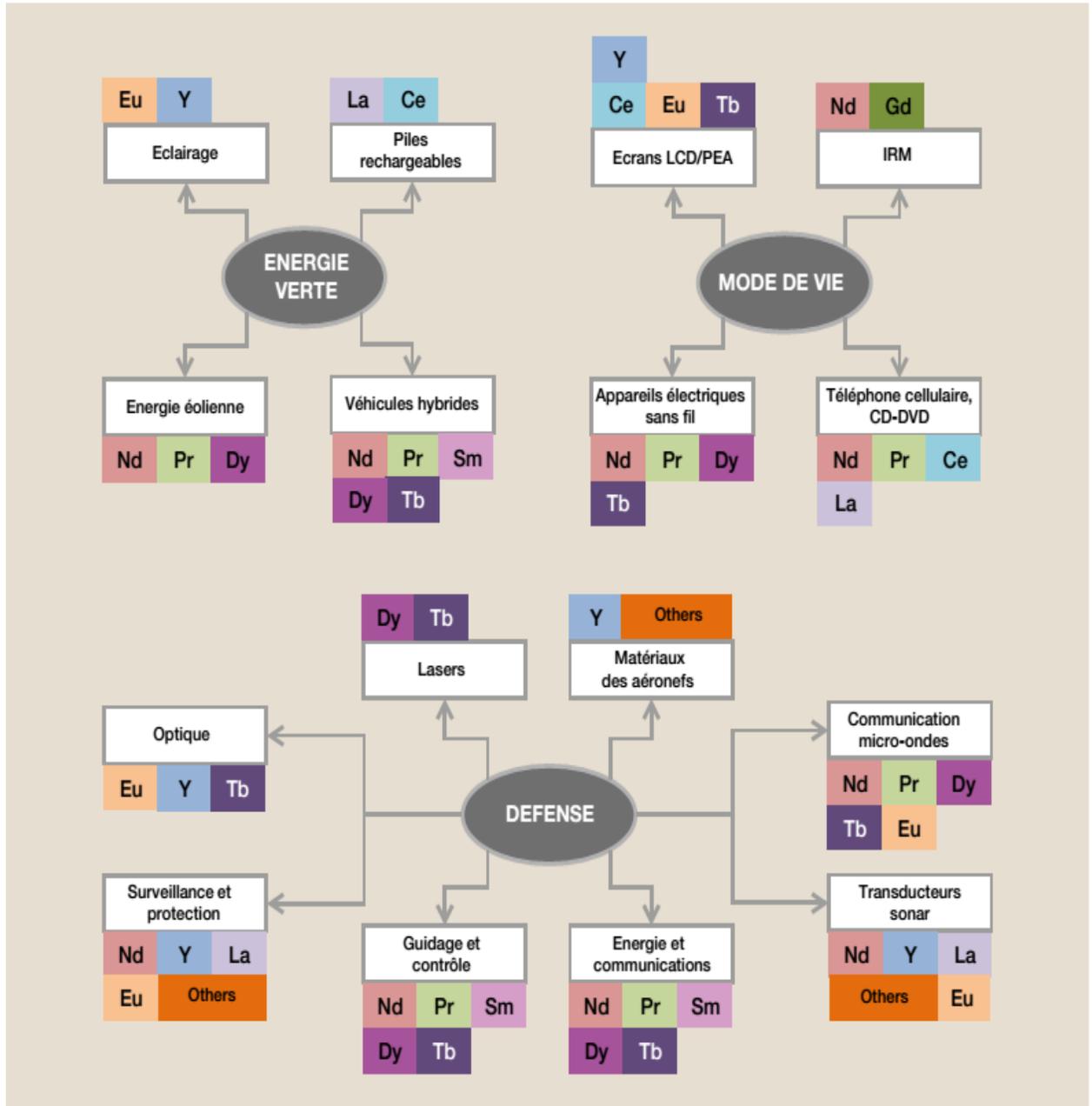
- **Propriétés optiques:** transitions électroniques dans le visible conduisant à des absorptions ou émissions à caractères très monochromatiques (émissions utilisées pour la composition des couleurs - verres, diodes, ampoules basses consommation, TV, etc...)
- **Propriétés magnétiques :** aimantation à saturation très supérieure à celle du fer. Mais propriétés obtenues à basse température. A température ambiante, elles sont para- ou diamagnétiques.
- Effet magnéto-calorique
- **Nucléaire:** section de captures de neutron importante.
- **Propriétés chimiques des oxydes:** très bonne affinités pour l'oxygène/ métallurgie et catalyse.<sup>[19]</sup>

### III.3. Utilisations

Certes, dans le domaine des nouvelles technologies, leurs propriétés magnétiques et optiques exceptionnelles en font un enjeu de premier plan. En agriculture, l'application d'engrais à base d'ETR conduit à une augmentation moyenne de la productivité de 5 à 15 % pour une centaine d'espèces cultivées (blé, haricot, maïs, etc.). Loin de s'arrêter au domaine végétal, les ETR trouvent aussi un usage dans l'élevage. Leur consommation sous forme de compléments alimentaires entraîne un gain de poids profitable chez plusieurs espèces animales (porc, vache, poule, etc.) et est



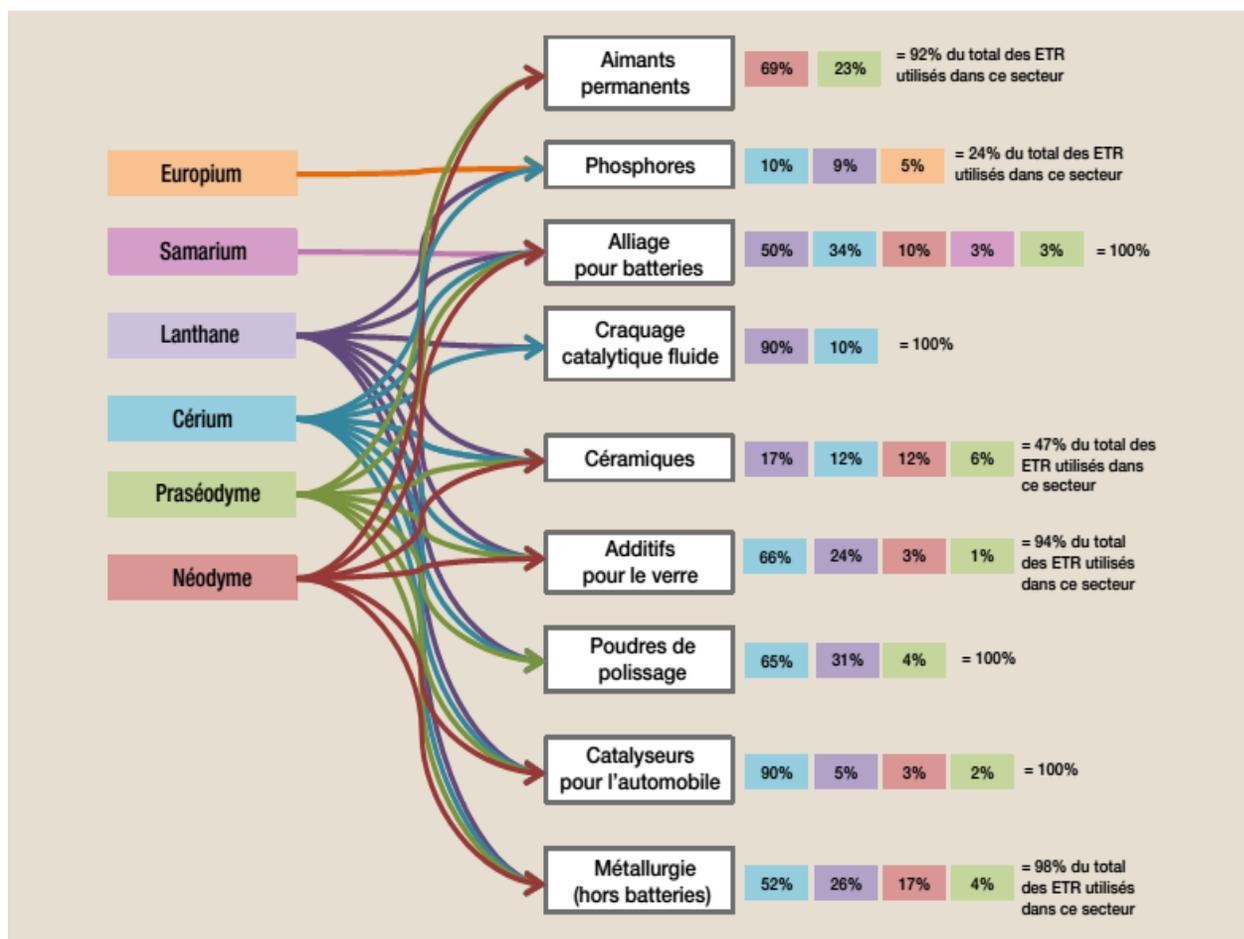
également mentionnée comme une solution de rechange potentielle à l'utilisation parfois critiquée des antibiotiques. De même, ces métaux peuvent être bénéfiques pour l'humain. L'ingestion de lanthane est par exemple prescrite à certains patients atteints de maladies chroniques des reins. [28]



Source : Secrétariat de la CNUCED d'après Great Western Minerals Group Ltd

Figure 5 : Secteurs finaux employant les terres rares comme intrant [29]





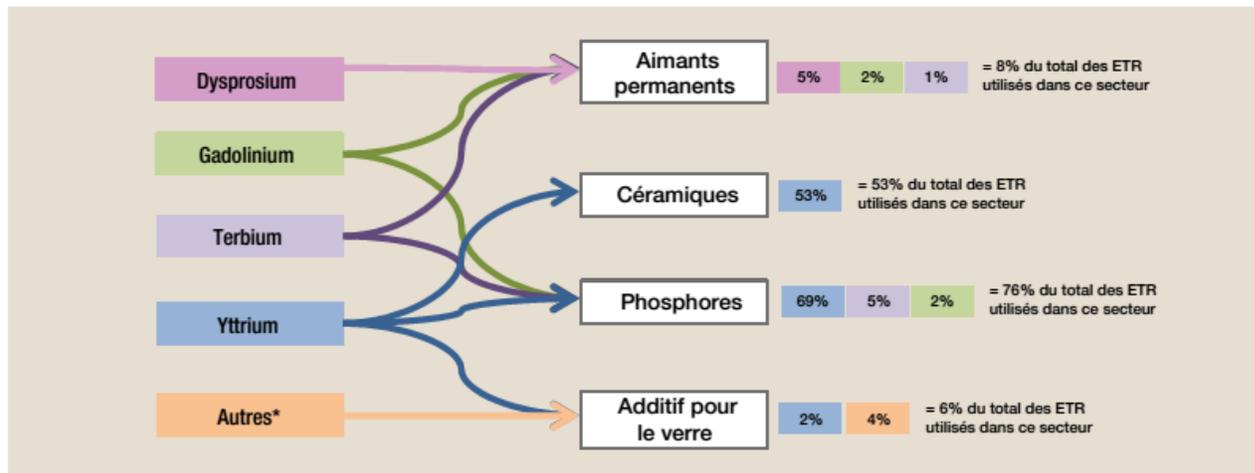
Source : Secrétariat de la CNUCED d'après les informations statistiques publiées dans : *Once Ignored On The Periodic Table, Don't Ignore Them Now - A Rare Earth Element Industry Overview*. Canadian Imperial Bank of Commerce (CIBC). (6 mars 2011). <http://fr.slideshare.net/RareEarthsRareMetals/cibc-report>

Note(s) : Les données indiquées sur le côté droit du schéma sont valables pour l'année 2011. Elles représentent la part de chaque TRLE utilisée dans chaque industrie, en pourcentage du total des terres rares utilisées dans ladite industrie. Par exemple, le panier des TRLE utilisées dans l'industrie des aimants permanents se composait en 2011, de 69 pour cent de Néodyme et de 23 pour cent de Praséodyme (ainsi que de 8 pour cent de TRLO).

Figure 6: Principales industries de produits semi-finis utilisant les terres rares légères comme intrants [29]

Concernant les TRLE, le Cérium et le Lanthane sont utilisés dans presque toutes les industries (8 sur 9) du fait de leur polyvalence, tandis que le recours au Samarium et à l'Europium est essentiellement réservé aux industries des alliages pour batteries et des phosphores. Finalement, l'Yttrium joue un rôle essentiel dans l'industrie céramique et dans celle des phosphores avec plus de la moitié du total des terres rares utilisées dans chacun de ces secteurs.





Source : Secrétariat de la CNUCED d'après les informations statistiques publiées dans : *Once Ignored On The Periodic Table, Don't Ignore Them Now - A Rare Earth Element Industry Overview*. Canadian Imperial Bank of Commerce (CIBC). (6 mars 2011). <http://fr.slideshare.net/RareEarthsRareMetals/cibc-report>

Note(s) : Les données indiquées sur le côté droit du schéma sont valables pour l'année 2011. Elles représentent la part de chaque TRLO utilisée dans chaque industrie en pourcentage du total des terres rares utilisées dans ladite industrie. Par exemple, le panier des TRLO utilisées dans l'industrie des aimants permanents se composait en 2011, de 5 pour cent de Dysprosium, de 2 pour cent de Gadolinium et de 1 pour cent de Terbium (ainsi que de 92 pour cent de TRLE). \* Les informations concernant le Prométhium, l'Holmium, l'Erbium, le Thulium, l'Ytterbium, le Lutécium et le Scandium ont été agrégées dans la catégorie "autres" de ce schéma.

Figure 7: Principales industries de produits semi-finis utilisant les terres rares lourdes, avec l'Yttrium et le Scandium comme intrants [29]

Cependant, malgré cette faible teneur dans les produits semi-finis, les TRLO demeurent essentielles dans les domaines dans lesquels elles sont employées.

### III.4. Mécanisme de concentration et types de gisements

Les terres rares, contrairement à ce que leur nom indique, ne sont pas particulièrement rares en termes d'abondance dans la croûte terrestre. Par exemple, le cérium, terre rare la plus abondante, est plus commun dans la croûte continentale (42 ppm) que ne le sont le cuivre (24 ppm) ou le plomb (12,6 ppm) (Rudnick et Fountain, 1995). Excepté le prométhium, toutes les terres rares sont plus abondantes que l'argent ou le mercure. Mais contrairement aux métaux de base et aux métaux précieux, la découverte de concentration en terre rare à des niveaux économiques est beaucoup plus problématique.

Les terres rares font parties des éléments lithophiles réfractaire et incompatibles. Lors de la cristallisation du magma (pendant le refroidissement) ces éléments seront peu intégrés dans les

premiers minéraux qui se formeront (éléments incompatibles) et se concentreront dans « les jus » de fin de cristallisation.<sup>[19]</sup>

La majorité des gisements de terres rares sont associés à des variétés peu communes de roches ignées, les roches alcalines et les carbonatites. La formation des roches alcalines et l'origine des minéralisations en métaux rares qui leur sont associées. Des concentrations appréciables de minéraux riches en terres rares sont également présents dans des gisements de type placer, dans des gisements résiduels formés par altération de roches magmatiques déjà enrichies en terres rares, dans des pegmatites et dans les gisements de type iron-oxide copper-gold (IOCG).

#### III.4.1. Gisements associés aux carbonatites

Les carbonatites sont des roches ignées qui contiennent plus de 50% de carbonates. Elles sont considérées comme originaires de magmas venant du manteau supérieur riches en dioxyde de carbone et pauvre en silice. Ces carbonatites forment des massifs intrusifs de petite dimension (3 à 5 km) à l'intérieur des complexes alcalins. On recense plus d'une centaine d'intrusions carbonatitiques dans le monde. Ces gisements sont particulièrement enrichis en terres rares légères concentrées dans des minerais tels que la bastnaésite, l'allanite, l'apatite ou encore la monazite.

Exemple de gisements associés aux carbonatites : Mountain Pass (Etats-Unis), Bayan Obo (Chine).<sup>[30][31]</sup>

#### III.4.2. Gisements associés aux roches ignées alcalines

Les roches ignées alcalines ultrabasiques ou felsiques (roches riches en potassium et en sodium) constituent elles aussi d'excellents gisements d'ETR. On peut aller plus loin en distinguant d'autres catégories telles que les roches ignées peralcalines qui se caractérisent par des proportions moléculaires en soude et en potasse plus élevées que celles en alumine. Elles sont donc sursaturées en ions alcalins Na et/ou K et sous saturées en alumine. Plusieurs dépôts de terres rares sont associés à ce type de roches. Ces gisements, bien qu'ils constituent de gros volumes, ne contiennent que de faibles teneurs en ETR mais sont bien souvent enrichis en terres rares lourdes.



Exemple de gisement associé aux roches ignées alcalines : Le complexe alcalin d'Ilimaussaq, situé dans le sud du Groenland, contient des gisements potentiellement exploitables d'ETR. <sup>[30][31]</sup>

#### III.4.3. Gisements de type oxyde de fer-cuivre-or (IOCG)

On retrouve également parfois des concentrations en ETR dans des gisements de type IOCG, ou dépôts Fe-ETR. Ils se forment à partir d'une large gamme de roches et contiennent des minerais de terres rares tels que la bastnaésite, la monazite, le xénotime, l'allanite, la parasite et l'apatite. Les terres rares y sont exploitées en tant que sous-produits de l'extraction du fer, du cuivre et de l'or. Exemple de gisements de type IOCG : Olympic Dam (Australie). <sup>[30][31]</sup>

#### III.4.4. Gîtes résiduels

Dans les environnements tropicaux, l'altération intense des roches occasionne la formation de sols latéritiques riches en aluminium et en fer de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. Les processus de formation de ces sols concentrent les minéraux lourds sous forme de gisements résiduels, causant la formation d'un horizon enrichi en métal au-dessus de la roche mère saine, donnant parfois des concentrations économiques en TR. Le gisement de Mount Weld à l'ouest de l'Australie appartient à ce type. Il est associé à un dépôt latéritique développé au-dessus d'une intrusion de carbonatite daté du protérozoïque. On peut également rattacher aux gisements résiduels un type particulier de gisements de TR appelé « ion-adsorption clays », formé par lessivage des TR lors de l'altération latéritique qui sont ensuite fixées par adsorption à la surface des argiles (kaolinite et halloysite) (Chi et Tian, 2008). Actuellement, ce type de gisement est connu en Chine du Sud et au Kazakhstan où les teneurs varient de 0,03 à 0,30 %. La libération des TR adsorbées est réalisée par simple circulation d'un fluide acide envoyé directement sur les sols latéritiques.

#### III.4.5. Gîtes en placer

Les placers sont des gisements sédimentaires, généralement d'origine alluvionnaire. Les minéraux lourds sont transportés par le courant de rivière avec du sable et des graviers, et se déposent dans des sites spécifiques (de moindre énergie) de lits anciens ou récents appelés

placers alluviaux. Ces gisements peuvent contenir des concentrations économiquement exploitables d'ETR. Les placers d'âge tertiaire (entre -65 et -2,5 millions d'années) et quaternaire (de -2,5 millions d'années jusqu'à notre ère) sont les plus susceptibles de renfermer des terres rares. Toutefois, des dépôts plus vieux datant du précambrien (de la formation de la Terre à -540 millions d'années), appelés paléoplacers, ont aussi été reconnus comme renfermant des ETR. Orris et Gauch ont identifié plus de 300 placers contenant des ETR à travers le monde. Certains minéraux riches en TR tels que la monazite-(Ce) et le xénotime-(Ce) peuvent être concentrés avec les minéraux lourds classiques. Mais l'allanite et la loparite sont aussi des minerais d'ETR que l'on retrouve dans ce type de gisement. Les placers avec les plus fortes concentrations en monazite-(Ce) sont de types placer à ilménite et placer à cassitérite. <sup>[30][31]</sup>

#### III.4.6. Gisements associés aux pegmatites

Parmi les différents groupes existant, les pegmatites de type NYF, comme leur nom l'indique, sont particulièrement riches en Nb, Y, F et dans une moindre mesure TR lourdes, Be, Ti, Sc et Zr (Černý, 1991). Elles sont de composition granitique à tendance alcaline et se mettent en place à la périphérie des plutons granitiques, dans des environnements tectoniques variés. Bien que les concentrations en métaux rares y soient localement très élevées, la taille des corps pegmatitiques n'est généralement pas suffisante pour justifier une exploitation économique de ces gisements.

### III.5. Séparation

L'hydrométallurgie est l'une des techniques les plus intéressantes. La pyrométallurgie en est une autre, tandis que des procédés de chimie fine, extractive, séparative, peuvent être utilisés.

L'hydrométallurgie consiste à dissoudre certains matériaux du minerai à traiter dans un milieu aqueux acide, puis à en extraire les éléments recherchés en utilisant des solvants. Il faut trouver un élément peu présent parmi beaucoup d'autres très largement majoritaires. La métallurgie classique à haute température le fait, mais pas très sélectivement. L'hydrométallurgie est donc intéressante, sous réserve de faire attention, car l'extraction, comme le recyclage, peut



être très polluante. Il faut donc des procédés dès le début responsables et permettant de minimiser l'impact sur l'environnement.

De manière plus précise, on utilise de l'eau chargée. Le minerai ou le broyat de matériaux à recycler est dissous dans l'acide ; on fait alors des opérations de chimie séparative. On utilise des solvants organiques chargés d'extraire ce que l'on cherche ou d'autres opérations de séparation, comme la précipitation ou l'extraction par les résines échangeuses d'ions. Ces techniques sont très sélectives.

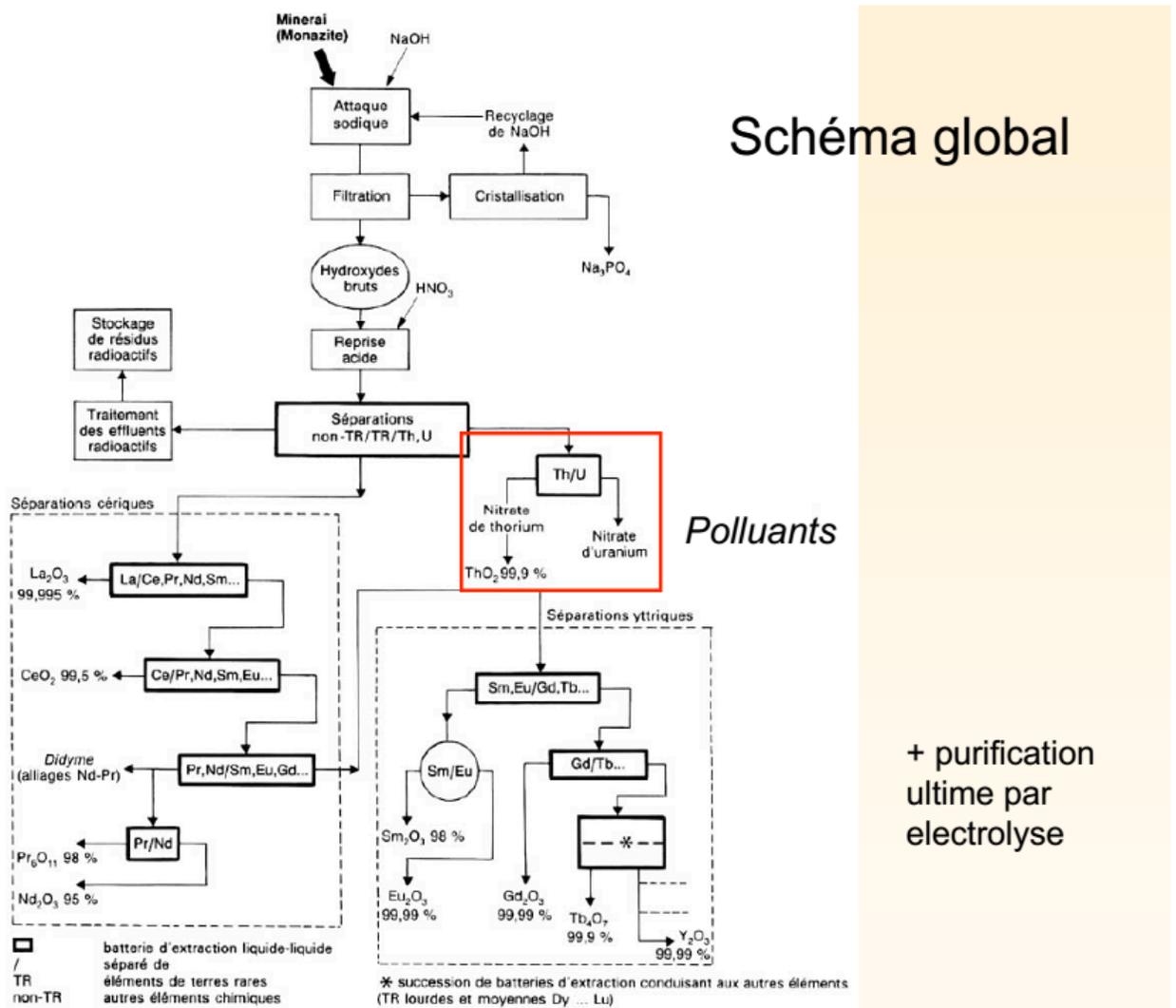


Figure 8: Exemple d'un flow-sheet de séparation des terres rares (1500 étages de séparation)



**PARTIE II :**

**CONCEPTION DU PROLOGiciel DE**

**MINERALOGIE, GEMMOLOGIE**

**ET DE TERRES RARES**

## **CHAPITRE IV : PRESENTATION DU THEME**

### **IV.1. Raison du choix du thème**

La Grande Ile dispose d'importantes réserves minérales dans son sous-sol, non seulement en pierres précieuses mais aussi en minerais industriels, et ceci, répartis dans tout le pays. Le secteur minier présente ainsi une opportunité économique importante à Madagascar. Diverses substances minières sont exploitées à l'aide des moyens techniques correspondant à l'aptitude de chaque exploitant, c'est-à-dire, soit par les grandes mines, soit par les petites mines.

Les petites mines regroupent les exploitants artisanaux, à petite échelle d'or, des pierres précieuses et semi précieuses telles que le saphir, le rubis, l'aigue marine, la tourmaline, la topaze, l'améthyste et l'émeraude. Même si leurs applications courent beaucoup de risque, de nombreux exploitants pratiquent cette forme d'exploitation du fait qu'elle ne nécessite qu'un faible apport en matériels, mais par contre de travaux manuels prépondérants. De plus, par comparaison aux grandes mines opérant sur Madagascar, les petites mines procurent des effets beaucoup plus tangibles et directs sur des centaines de milliers de personnes en leur fournissant des revenus supplémentaires à l'agriculture. Cependant, ces petits exploitants ont encore beaucoup à apprendre, notamment du savoir-faire et connaissance sur l'environnement minier. Ils se sont transmis entre eux les méthodes artisanales d'exploitation au risque de ne pouvoir reconnaître autres substances que ce qu'ils recherchaient et d'avoir laissé plusieurs substances intéressantes en leurs chemins. Pourtant, ce n'est pas l'envi d'apprendre qui leur en manque. La conjugaison de ce désir d'avoir une certaine connaissance sur l'environnement minier et d'être un acteur plein d'énergie et de volonté conduit à un professionnalisme par excellence. De ce fait, un appui devrait leur être fourni et la notion en minéralogie en fera une base importante.

En outre, la connaissance des caractéristiques des minéraux est fondamentale en joaillerie ou en orfèvrerie, comme en lapidairerie et en gemmologie. Depuis l'identification du minéraux jusqu'à son taillage ou montage (selon l'objectif voulu), les caractéristiques de ce dernier, que ce soit physiques ou optiques, seront toujours très indispensables.

Mais ce n'est seulement pour la joaillerie ou l'objet d'art que les minéraux sont utilisés, ils sont aussi employés dans la fabrication de divers produits (papier, peinture plastique, caoutchouc, ...) ou dans des procédés industriels (filtration, polissage, absorption, décontamination, ...) grâce



à leurs propriétés physiques ou chimiques. Certains métaux font même partie de notre quotidien sans en avoir conscience. Cependant, les ressources minérales, une fois extraite du sous-sol n'y sont plus renouvelées. De ce fait, certains métaux très utilisés sont maintenant classés comme stratégiques. Ces derniers sont des éléments clés de la production de produits technologiques et innovants, dont l'approvisionnement doit être sécurisé. Les propriétés spécifiques de ces métaux les rendent essentielles et difficilement substituables pour une application industrielle donnée. Les terres rares en feront partie. En raison des propriétés physico-chimiques très spécifiques des terres rares, leur utilisation est aujourd'hui devenue indispensable au développement de nombreuses technologies de pointe. Pourtant, contrairement aux autres métaux stratégiques, ces dernières restent mal connues par le grand public.

De tout ce qui précède, une base de données sur la minéralogie, gemmologie et les terres rares s'avère être pratique et intéressante.

#### **IV.2. Résultats attendus**

Entant que base de données, le stockage des données sera donc assuré. Cependant, une interface graphique devrait être mise en place afin de faciliter la manipulation, l'utilisation et la modification de la masse d'information relative à chaque minéral ou métaux. Ainsi, le progiciel permettra d'ajouter, de rechercher et de modifier des données.

#### **IV.3. Pré-analyse**

Suite à une longue discussion avec mon encadreur pédagogique et l'analyse de quelques documents, les avantages procurés par une base de données minéralogique et gemmologique ont été constatés. Madagascar recèle des ressources naturelles non négligeables, ainsi avoir une base de données sur les gemmes et minéraux de la Grande Ile ne peut qu'être bénéfique. Cependant, le fait d'avoir des informations sur les autres matériaux existant dans le monde sera pratique.



#### IV.4. Méthodologie d'approche

La première étape consiste à collecter des données, et ce n'est que lorsque les matières rassemblées sont suffisantes pour étayer le thème choisi que le sujet soit défini de façon plus approfondie tout en délimitant le champ notionnel.

Etant donné que la minéralogie étudie tous les minéraux, les documents concernant cette dernière s'avèrent ainsi être une bonne référence afin de bien développer le sujet. De ce fait, les caractéristiques physiques et chimiques des minéraux se furent notées en premier. Par la suite, les ouvrages relatifs à la gemmologie ont été sollicités. Tout au long de la lecture de ces documents, des notes ont été prises et de nombreuses questions se sont bousculées. Ceux-ci m'ont poussé à chercher plus loin, et m'ont ramené à des métaux tellement utilisés mais peu connus par le grand public, les terres rares. La curiosité d'en savoir plus sur ces métaux m'a induit à les inclure dans le projet.

Les grandes lignes du travail seront ensuite tirées de l'écheveau des notes, documents et réflexions. Ainsi, un plan provisoire a pu être construit. Les idées forces se précisent au fil du temps et de nouvelles questions ou des points à élucider apparaissent.

Une fois la phase d'investigation terminée, le traitement systématique sera entrepris. A cet effet, les données seront confrontées. Afin de mieux clarifier la démarche, un schéma montrant le cheminement de ces données sera élaboré. Ceci permettra de suivre le flux des données.

Une vision globale sera alors effectuée et la structure du travail peut être stabilisée en adoptant le plan définitif, notamment le système d'information à mettre en place.

### **CHAPITRE V : CONCEPTION DU SYSTEME D'INFORMATION**

#### **V.1. Quelques définitions**

Le *système d'information* (SI) est un ensemble organisé de ressources qui permet de collecter, stocker, traiter et distribuer de l'information, en général grâce à un ordinateur.

Une *base de données* (BD) est un outil permettant de stocker et de retrouver l'intégralité de données brutes ou d'informations en rapport avec un thème ou une activité. C'est une modélisation



théorique et informatisée de la réalité. En tant que telle, une base de données doit être précise et facile à accéder et à exploiter. C'est la pièce centrale d'un système d'information.

Le *système de gestion de base de données* (SGBD) est une suite de programmes qui manipule la structure de la base de données et dirige l'accès aux données qui y sont stockées. En d'autres termes, il assure le rôle d'interface entre les utilisateurs et la mémoire (la base). Il cache la complexité des opérations et offre une vue synthétique sur le contenu.

La phase de conception d'un système d'information nécessite des méthodes permettant la mise en place d'un modèle d'appui. La modélisation consiste à créer une représentation virtuelle d'une réalité de telle façon à faire ressortir les points intéressants. Ce type de méthode est appelé *analyse*. Plusieurs méthodes d'analyse existent, mais ce projet va être modélisé avec la Méthode d'Etude et de Réalisation Informatique pour le Système des Entreprises (MERISE).

## V.2. Aperçu sur les SGBD <sup>[39]</sup>

Il est difficile de définir ce qu'est une base de données si ce n'est que de dire trivialement que tout système d'information peut être qualifié de base de données. Il semble plus facile de définir l'outil principal de gestion d'une base de données :

- c'est un outil permettant d'insérer, de modifier et de rechercher l'emplacement des données spécifiques dans une grande masse d'informations ;
- c'est une interface entre les utilisateurs et la mémoire secondaire facilitant le travail des utilisateurs en leur donnant l'illusion que toutes les informations sont comme ils le souhaitent. Chacun doit avoir l'impression qu'il est le seul à utiliser ces informations.

### V.2.1. Historique sur les SGBD <sup>[35]</sup>

Les premiers SGBD sont réellement apparus à la fin des années 60. La première génération de SGBD est marquée par la séparation de la description des données et de la manipulation par les programmes d'application. Elle coïncide aussi avec l'avènement des langages d'accès navigationnels, c'est-à-dire permettant de se déplacer dans des structures de type graphe et d'obtenir,



un par un, des articles de fichiers. Cette première génération, dont l'aboutissement est marqué par les recommandations du CODASYL, est basée sur les modèles réseau ou hiérarchique, c'est-à-dire des modèles de données organisés autour de types d'articles constituant les nœuds d'un graphe, reliés par des types de pointeurs composant les arcs du graphe. Cette génération a été dominée par les SGBD TOTAL, IDMS, IDS 2 et IMS 2. Elle traite encore aujourd'hui une partie importante du volume de données gérées par des SGBD.

La deuxième génération de SGBD a grandi dans les laboratoires depuis 1970, à partir du modèle relationnel. Elle vise à enrichir mais aussi à simplifier le SGBD externe afin de faciliter l'accès aux données pour les utilisateurs. En effet, les données sont présentées aux utilisateurs sous forme de relations entre domaines de valeurs, simplement représentées par des tables. Les recherches et mises à jour sont effectuées à l'aide d'un langage non procédural standardisé appelé SQL (Structured Query Language). Celui-ci permet d'exprimer des requêtes traduisant directement des phrases simples du langage naturel et de spécifier les données que l'on souhaite obtenir sans dire comment les accéder. C'est le SGBD qui doit déterminer le meilleur plan d'accès possible pour évaluer une requête. Cette deuxième génération reprend, après les avoir faits évoluer et rendus plus souples, certains modèles d'accès de la première génération au niveau du SGBD interne, afin de mieux optimiser les accès. Les systèmes de deuxième génération sont commercialisés depuis 1980. Ils représentent aujourd'hui l'essentiel du marché des bases de données. Les principaux systèmes sont ORACLE, INGRES, SYBASE, INFORMIX, DB2 et SQL SERVER. Ils supportent en général une architecture répartie, au moins avec des stations clients transmettant leurs requêtes à de puissants serveurs gérant les bases.

La troisième génération a été développée dans les laboratoires depuis le début des années 80. Elle commence à apparaître fortement dans l'industrie avec les extensions objet des systèmes relationnels. Elle supporte des modèles de données extensibles intégrant le relationnel et l'objet, ainsi que des architectures mieux réparties, permettant une meilleure collaboration entre des utilisateurs concurrents. Cette troisième génération est donc influencée par les modèles à objets, intégrant une structuration conjointe des programmes et des données en types, avec des possibilités de définir des sous-types par héritage. Cependant, elle conserve les acquis du relationnel en permettant une vision tabulaire des objets et une interrogation via le langage SQL étendu aux objets. Elle intègre aussi le support de règles actives plus ou moins dérivées de la logique. Ces règles permettent de mieux maintenir la cohérence des données en répercutant des mises à jour d'un objet



sur d'autres objets dépendants. Les systèmes objet relationnels tels Oracle 8, DB2 Universal Database ou Informix Universal Server, ce dernier issu du système de recherche Illustra, sont les premiers représentants des systèmes de 3<sup>e</sup> génération. Les systèmes à objets tels Object Store ou O2 constituent une voie plus novatrice vers la troisième génération. Tous ces systèmes tentent de répondre aux besoins des nouvelles applications (multimédia, Web, CAO, bureautique, environnement, télécommunications, etc.).

Quant à la quatrième génération, elle est déjà en marche et devrait mieux supporter Internet et le Web, les informations mal structurées, les objets multimédias, l'aide à la prise de décisions et l'extraction de connaissances à partir des données. Certes, il devient de plus en plus dur de développer un nouvel SGBD. On peut donc penser que les recherches actuelles, par exemple sur l'interrogation par le contenu des objets multimédias distribués et sur l'extraction de connaissances (data mining) conduiront à une évolution des SGBD de 3<sup>e</sup> génération plutôt qu'à une nouvelle révolution. Ce fut déjà le cas lors du passage de la 2<sup>e</sup> à la 3<sup>e</sup> génération, la révolution conduite par l'objet ayant en quelque sorte échoué : elle n'a pas réussi à renverser le relationnel, certes bousculé et adapté à l'objet. Finalement, l'évolution des SGBD peut être perçue comme celle d'un arbre, des branches nouvelles naissant mais se faisant généralement absorber par le tronc, qui grossit toujours d'avantage.

De nombreux SGBD sont aujourd'hui disponible sur micro-ordinateurs. La plupart sont dotés de capacités relationnelles, bien que l'ancêtre des SGBD sur micro, DBase (Borland) ne soit qu'un gestionnaire de fichiers structurés avec un langage de programmation. On peut citer FoxPro (clone de DBase) et Access (Microsoft) et Paradox (Borland). Sur stations de travail et mini ordinateurs sous Unix, trois ou quatre SGBD relationnels dominant : Oracle, Ingres, Informix, Sybase. DB2 (IBM) est un SGBD relationnel sur main frame.

Les SGBD, qui sont la raison d'être de l'informatique de gestion, ont vu leur domaine d'utilisation s'élargir considérablement. Bases de connaissances, systèmes experts, systèmes d'information géographique (SIG), édition de documents informatisés (EDI), système d'information documentaire (SID), conception assistée par ordinateur (CAO), et la gestion de production assistée par ordinateur (GPAO) sont des domaines où une information structurée est enregistrée et gérée par un SGBD générique (relationnel), et traitée selon des besoins spécifiques, l'interface et les outils de traitement, dépendant plus particulièrement de l'application.



### V.2.2. Les différents modèles de SGBD

Il existe cinq modèles de SGBD, différenciés selon la représentation des données qu'elle contient :

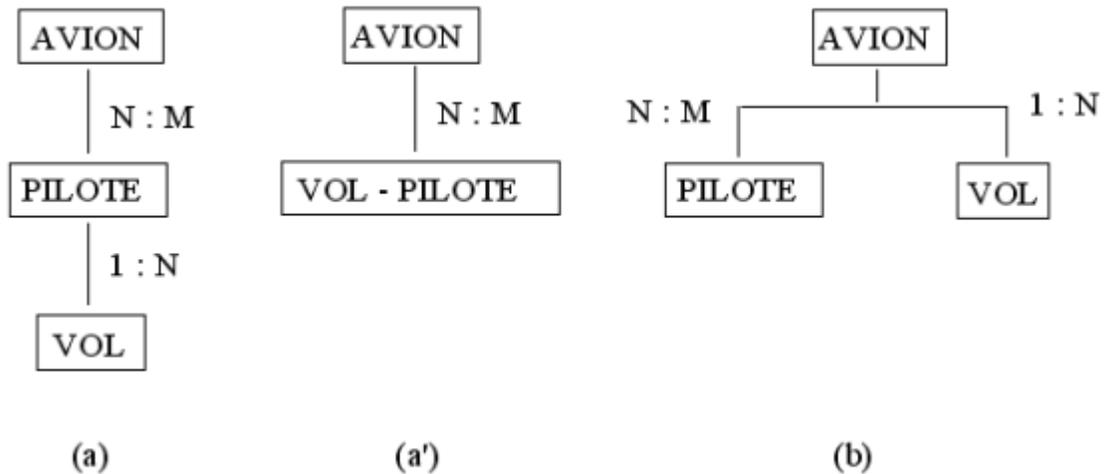
#### V.2.2.1. Modèle navigationnel

##### a. *SGBD hiérarchique* <sup>[39][40]</sup>

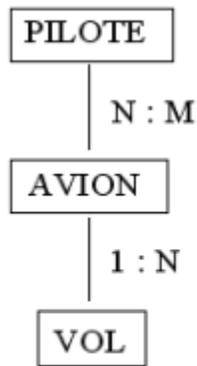
Les données sont classées hiérarchiquement, selon une arborescence descendante. Ce modèle utilise des pointeurs entre les différents enregistrements. Les liens sont exclusivement de type 1 : N. Il s'agit du premier modèle de SGBD

Par exemple, pour représenter les liens de la BD "Avions" nous devons choisir entre diverses arborescences qui privilégient l'une des entités AVION, PILOTE ou VOL comme racine. Le choix de VOL n'est pas intéressant car aucun lien hiérarchique (de type 1 : N) n'émerge de cette entité.

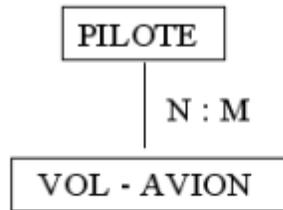
➤ Choix de l'entité AVION comme racine



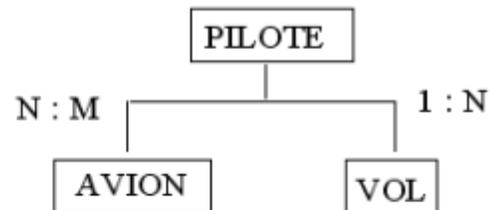
- Choix de l'entité PILOTE comme racine



(c)



(c')



(d)

Ce modèle procure ainsi des avantages comme :

- son adéquation avec les entreprises à structure arborescente (un grand nombre d'organisations économiques et sociales correspondent à ce modèle) ;
- sa simplicité et la facilité de son implémentation ;
- l'adéquation de la structure du schéma et des besoins des utilisateurs.

Cependant, il représente plusieurs inconvénients dont :

- l'impossibilité de représenter directement les liens N : M qui entraîne des redondances ;
- des anomalies pour les opérations de stockage : la suppression d'un noeud entraîne la disparition des descendants, l'insertion d'une information impose la création d'un segment parent, le remplacement d'une information doit s'effectuer pour toutes ses occurrences dans des arbres distincts ;
- un chemin d'accès unique aux données ;
- l'indépendance logique très réduite.





Cependant, il n'a pas d'indépendance vis à vis des stratégies d'accès.

#### V.2.2.2. Modèle relationnel

Le modèle relationnel est basé sur une organisation des données sous forme de tables. La manipulation des données se fait selon le concept mathématique de relation de la théorie des ensembles, c'est-à-dire l'algèbre relationnelle. L'algèbre relationnelle a été inventée en 1970 par E.F. Codd, le directeur de recherche du centre IBM de San José. Elle est constituée d'un ensemble d'opérations formelles sur les relations. Les opérations relationnelles permettent de créer une nouvelle relation (table) à partir d'opérations élémentaires sur d'autres tables (par exemple l'union, l'intersection, ou encore la différence).

La modélisation relationnelle permet de représenter les relations à l'aide de tables (à deux dimensions) dont chaque colonne a un identificateur qui représente un domaine. Une ligne du tableau représente donc une entité et chacune des cases représente un de ses attributs.

Le concept de base de ce modèle sera présenté dans le chapitre V.3.2, étant donné que c'est le modèle utilisé dans le présent projet.

#### V.2.2.3. Modèle plus complexe

##### **a. SGBD déductifs** <sup>[39]</sup>

Les données sont représentées sous forme de table, mais leur manipulation se fait par calcul de prédicats, c'est-à-dire, le modèle utilise l'algèbre booléenne.

##### **b. SGBD à objets (ou orientés objets)** <sup>[39]</sup>

Les données sont stockées sous forme d'objets, c'est-à-dire, des structures appelées classes présentant des données membres. Les champs sont des instances de ces classes. Ce modèle s'est inspiré des langages de programmation à objet, donc, utilise de l'encapsulation, l'héritage, le polymorphisme, l'agrégation et la composition.



### V.2.3. Rôles et types

Un SGBD permet à un utilisateur de communiquer avec une base de données pour :

- décrire et organiser les données sur les mémoires secondaires (disques) ;
- rechercher, sélectionner et modifier les données.

Un SGBD offre la possibilité à l'utilisateur de manipuler les représentations abstraites des données, indépendamment de leur organisation et de leur implantation sur les supports physiques (mémoires).

On peut considérer un SGBD comme un interpréteur d'un langage de programmation de haut niveau qui, dans le cas idéal, permet à l'utilisateur de décrire précisément ce qu'il veut obtenir et non comment l'obtenir : « quoi » et non « comment », c'est-à-dire, formuler une assertion et non décrire une procédure (langage assertionnel – langage procédural).

Un SGBD assure :

- la description des données ;
- leur recherche et mise à jour ;
- la sûreté : vérifier les droits d'accès des utilisateurs, limiter les accès non autorisés, crypter les informations sensibles ;
- la sécurité : sauvegarder et restaurer les données, limiter les erreurs de saisie, de manipulation ;
- l'intégrité : définir des règles qui maintiennent l'intégrité de la base de données (contraintes d'intégrité) ;
- la concurrence d'accès : détecter et traiter correctement les cas dans lesquels des conflits d'accès entre plusieurs utilisateurs subsistent.

Pour le présent projet, le SGBDR sera adopté du fait de sa simplicité : afin d'accéder aux données, différents opérateurs logiques, notamment la sélection (ou projection) mais aussi des jointures seront utilisés. Les opérations seront ensuite communiquées sous forme de requêtes aux SGBDR. De nos jours, de nombreux logiciels destinés à ces types de systèmes existe dont :

- Borland Paradox ;
- Filemaker ;
- IBM DB2 ;



- Ingres ;
- Interbase ;
- Microsoft SQL server ;
- Microsoft Accès ;
- Microsoft FoxPro ;
- Oracle ;
- Sybase ;
- MySQL ;
- PostgreSQL ;
- mSQL ;
- SQL Server 11.

Pour la modélisation préalable à la création de la base de données sur le SGBDR, la méthode MERISE sera utilisée.

### V.3. La méthode MERISE <sup>[37][38]</sup>

#### V.3.1. Explication

La conception du système d'information se fait par étapes, afin d'aboutir à un système d'information fonctionnel reflétant une réalité physique. Il s'agit donc de valider une à une chacune des étapes en prenant en compte les résultats de la phase précédente. Le but de la méthode MERISE (Méthode d'Etude et de Réalisation Informatique pour le Système des Entreprises) est d'arriver à concevoir un système d'information en se basant sur la séparation des données et des traitements à effectuer en plusieurs modèles conceptuels et physiques, afin de vérifier que toutes les données nécessaires aux traitements sont présentes et qu'il n'y a pas de données superflues.

Cette succession d'étapes est appelée *cycle d'abstraction pour la conception des systèmes d'information*. La figure ci-après illustre ce cycle avec le modèle MERISE y afférent :



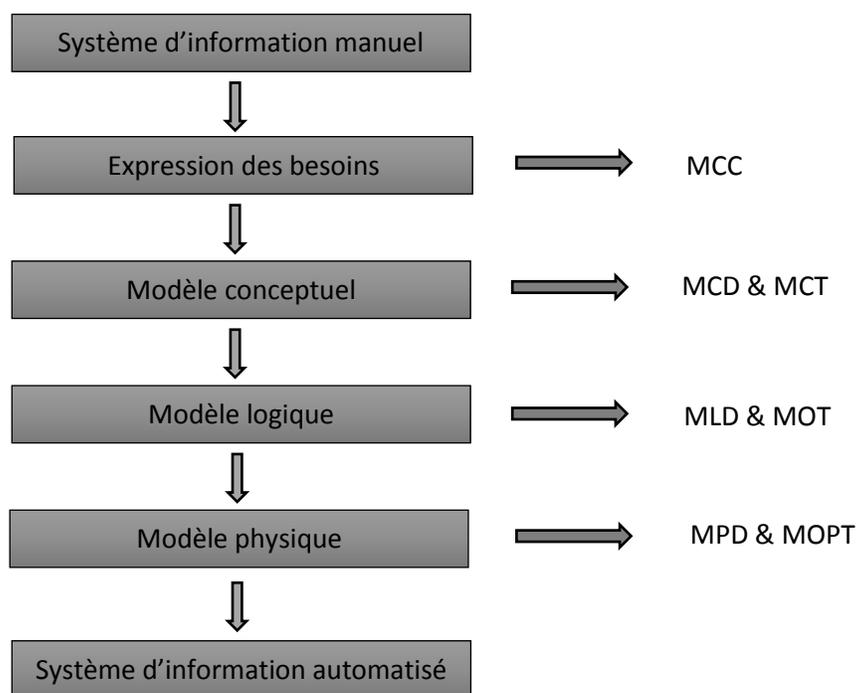


Figure 9 : Cycle d'abstraction pour la conception d'un SI avec les modèles MERISE

Cette étape consiste à définir le résultat attendu par le système, le sujet étant déjà défini évidemment. A cet effet, il faut visualiser les éléments (données) nécessaires et en entamer les collectes. La délimitation du système se fait ensuite en triant les données selon les besoins des futurs utilisateurs.

### V.3.2. Concept de base

Le modèle de données est la description de l'organisation des données. Il se trouve à l'intérieur de la base de données, et renseigne sur les caractéristiques de chaque type de donnée et les relations entre les différentes données qui s'y trouvent. Plusieurs types en existent, parmi lesquels le modèle *entité-association* adopté dans ce projet.



### V.3.2.1. Entités

Ce sont des regroupements de différentes informations communes à une même classe d'objets. Graphiquement, une entité est représentée par un rectangle dont l'entête est réservé au libellé et le reste du bas aux propriétés ou attributs des individus.

Les *attributs* sont les caractéristiques décrivant les entités et doivent être représentés comme une liste de mots, la plus simple possible, dans le cadre de l'entité correspondante.

Une entité est spécifiée par une propriété appelée *identifiant* qui peut être un code, numéro, référence ou matricule, ...

La figure ci-après illustre ces quelques propriétés d'une entité.

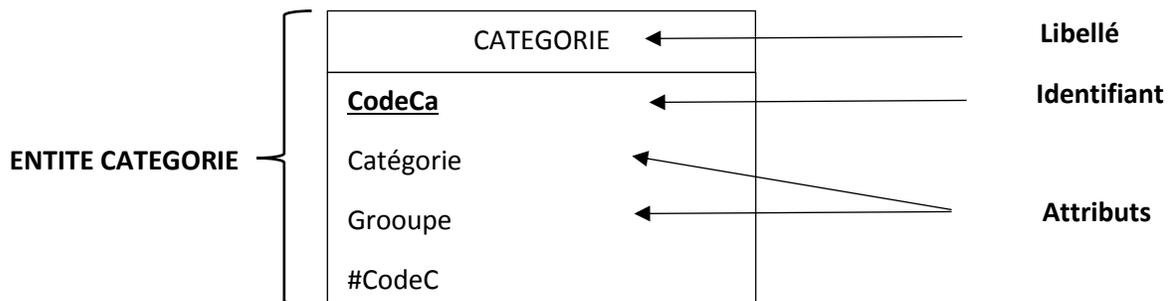


Figure 10 : Exemple d'entité

### V.3.2.2. Associations

Généralement, un certain nombre d'entités constitue le projet, il est donc impératif de les relier entre elle. Cette liaison appelée *association* ou *relation*, devrait refléter une signification bien précise.

En outre, le type de la relation à mettre en place est défini par deux couples de nombres (n,m) dits *cardinalités* du côté de chaque entité à relier. Les cardinalités les plus répandues sont les suivantes : 0,N ; 1,N ; 0,1 ; 1,1. Des règles de gestion imposant des cardinalités avec des valeurs particulières existent, mais cela reste assez exceptionnel et la présence de ces cardinalités imposera l'implantation de traitements supplémentaires.

La suivante figure éclaircira mieux ces propriétés :

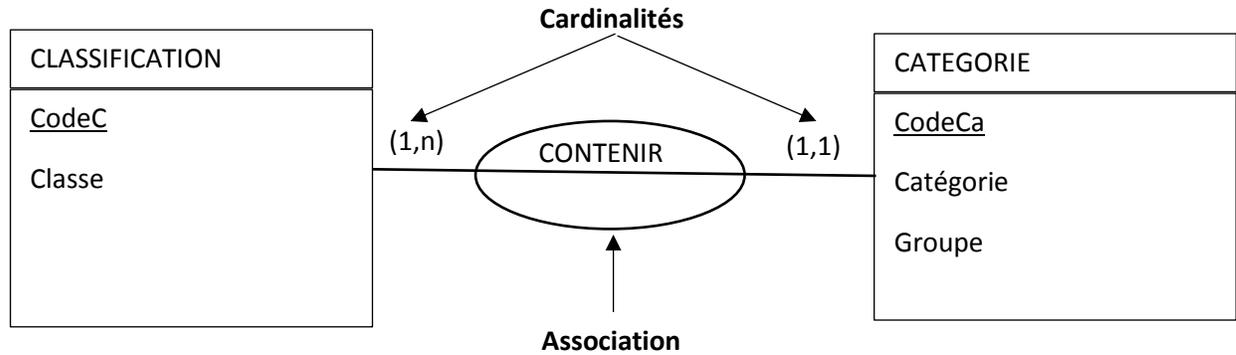


Figure 11 : Exemple d'association

*Explication des cardinalités :*

- (1,n) : une classification contient au moins 1 catégorie et au plus n catégories
- (1,1) : une catégorie est contenue dans une et une seule classification

### V.3.3. Modélisation <sup>[36]</sup>

Merise comprend plusieurs modèles :

- MCC : Modèle Conceptuel de la Communication ;
- MCD : Modèle Conceptuel des Données ;
- MLD : Modèle Logique des Données ;
- MPD : Modèle Physique des Données ;
- MCT : Modèle Conceptuel des Traitements ;
- MOT : Modèle Organisationnel des Traitements.

#### V.3.3.1. Modèle Conceptuel des Données (MCD)

Le MCD est une description et une modélisation de la problématique de façon rationnelle et explicite. Autrement dit c'est une conception d'un modèle de représentation des données. Le

système sera décrit à l'aide des entités et indépendamment des logiciels, sans contraintes techniques, organisationnelles ou économiques.

#### V.3.3.2. *Modèle Logique des Données (MLD)*

C'est le passage entre le Modèle Conceptuel de Données et l'implémentation physique de la base. Le MLD est indépendant du matériel et du logiciel, la description des données tient compte de leurs conditions d'utilisation (contraintes d'intégrité, historique, techniques de mémorisation)

#### V.3.3.3. *Modèle Physique des Données (MPD)*

Le MPD est une représentation de l'organisation des données tenant compte du SGBD qui sera utilisé. En général, celui-ci est présenté sous forme de tables comportant des champs. Toute entité devient une table dont les attributs en seront les colonnes et l'identifiant la clé primaire

#### V.3.3.4. *Modèle Conceptuel des Traitements (MCT)*

Le Modèle Conceptuel des Traitements décrit les traitements et plus précisément toutes les activités découlant des échanges entre le domaine étudié et le monde extérieur. Il exprime donc ce que fait le domaine sans se poser le problème de savoir qui le fait, quand et comment.

#### V.3.3.5. *Modèle Organisationnel des Traitements (MOT)*

Le Modèle Organisationnel des Traitements s'attache à décrire les propriétés des traitements non traitées par le MCT, c'est-à-dire: le temps, les ressources, le lieu. Le MOT consiste donc à représenter le MCT dans un tableau dont les colonnes sont la durée, le lieu, les responsables et ressources nécessaires à une action.



## V.4. Modélisation du projet

### V.4.1. Modèle Conceptuel de la Communication

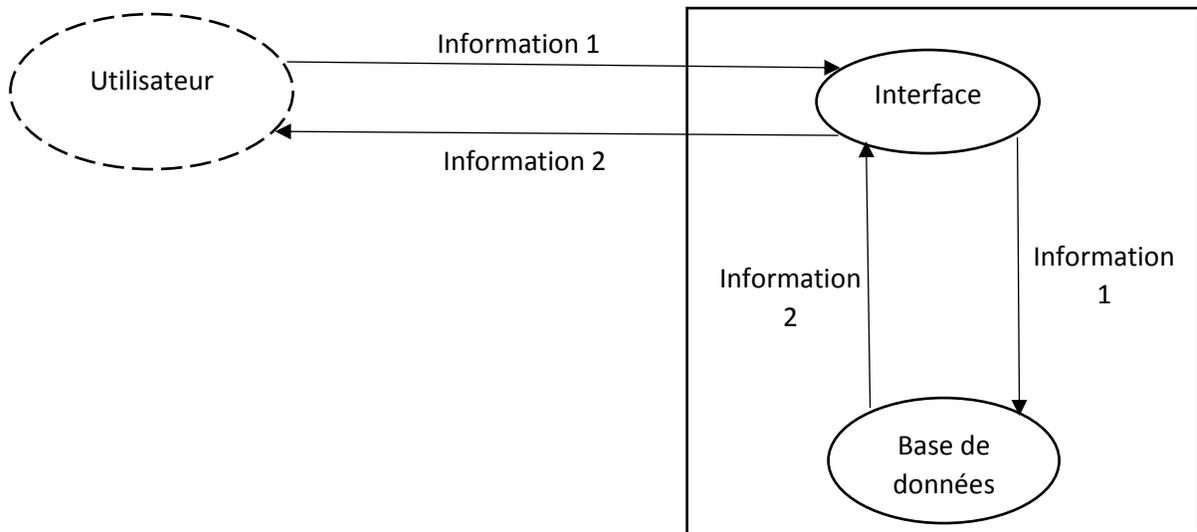


Figure 12: MCC

#### Explication

Dans un Modèle Conceptuel de la Communication :

- le rectangle représente l'organisation : le progiciel ;
- l'ellipse en pointillé montre les acteurs externes : les utilisateurs ;
- l'ellipse en continu indique les acteurs internes : l'interface graphique, la base de données ;
- les noms des informations communiquées sont écrit près des flèches ;
- la flèche exprime le sens de parcours des informations.

Le progiciel est doté d'une interface graphique permettant à l'utilisateur de communiquer avec la base de données qui permettra de stocker les informations. Ainsi, l'information détenue par l'utilisateur, avant d'être enregistrée dans la base, sera introduite dans l'interface, plus précisément, dans un formulaire. Concernant la recherche de données dans la base, ceci s'effectuera en introduisant le critère de recherche dans l'interface, à travers d'une zone de texte. Ensuite, cette dernière le passe vers la base de données qui procurera une réponse. Tout ceci est rendu possible par le système de gestion de base de données utilisé.



V.4.2. Modèle Conceptuel des Données

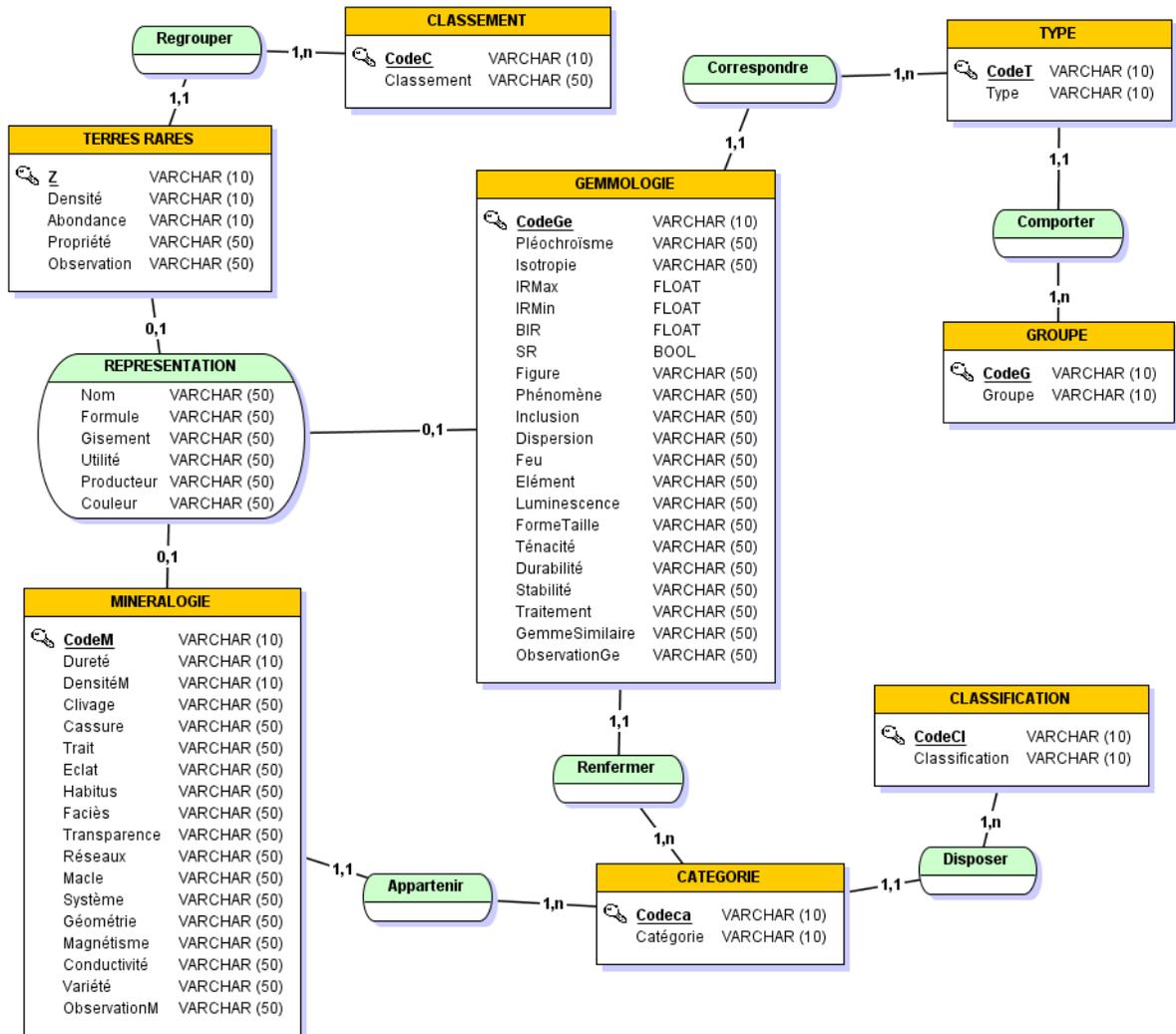


Figure 13: MCD

Explication des cardinalités

Tableau 6: Entités – Associations

Entités	Cardinalités
MINERALOGIE- CATEGORIE	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1, n) : une catégorie appartient au moins à un minéral et au plus à n minéraux</li> </ul>



	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (1,1) : un minéral appartient à une et une seule catégorie</li> </ul>
GEMMOLOGIE- CATEGORIE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (1, n) : une catégorie renferme au moins une gemme et au plus n gemmes</li> <li>• (1,1) : une gemme est renfermée par une et une seule catégorie</li> </ul>
CLASSIFICATION - CATEGORIE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (1, n) : une classification dispose au moins une catégorie et au plus n catégories</li> <li>• (1, 1) : une catégorie est disposée par une et une seule classification</li> </ul>
GROUPE -TYPE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (1, n) : un type comporte au moins un groupe et au plus n groupes</li> <li>• (1, 1) : un groupe est comportée par un et un seul type</li> </ul>
GEMMOLOGIE - TYPE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (1, n) : un type correspond au moins à une gemme et au plus à n gemmes</li> <li>• (1, 1) : une gemme correspond à un et un seul type</li> </ul>
CLASSEMENT - TERRES RARES	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (1, n) : un classement regroupe au moins un élément de terres rares et au plus n éléments de terres rares</li> <li>• (1, 1) : un élément de terres rares est regroupé dans un et un seul classement</li> </ul>
MINERALOGIE - GEMMOLOGIE - TERRES RARES	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (0, 1) : une représentation correspond à aucun ou à un minéral</li> <li>• (0, 1) : une représentation correspond à aucune ou à une gemme</li> <li>• (0,1) : une représentation correspond à aucun ou à un élément de terres rares</li> </ul>

#### V.4.3. Modèle logique de Données Relationnelles (MLDR)

Toute entité du MCD devient une table du MLDR, et donc une table de la Base de Données. Chaque propriété de l'entité devient un attribut de cette table, et donc une colonne appelée encore champ de la table correspondante. L'identifiant de l'entité devient la clé primaire de la table (celle soulignée). La clé primaire de la table à la cardinalité (X, n) s'ajoute et devient une clé étrangère (celle précédée par un #) dans la table à la cardinalité (X, 1) avec X= 0 ou 1. La clé primaire de la table à la cardinalité (0,1) devient une clé étrangère dans la table à la cardinalité (1,1).

En suivant ces règles, le MLDR du présent projet se présente comme suit :



- CLASSEMENT (CodeC, Classement)
- TERRES RARES (Z, Densité, Abondance, Propriété, Observation, #CodeC)
- CLASSIFICATION (CodeCl, Classification)
- CATEGORIE (CodeCa, Catégorie, #CodeCl)
- MINERALOGIE (CodeM, Dureté, DensitéM, Clivage, Cassure, Trait, Eclat, Habitus, Faciès, Transparence, Réseaux, Macle, Système, Géométrie, Magnétisme, Conductivité, Variété, ObservationM, #CodeCa)
- GROUPE (CodeG, Groupe)
- TYPE (CodeT, Type, #CodeG)
- GEMMOLOGIE (CodeGe, Pléochroïsme, Isotropie, IRMax, IRMin, BIR, SR, Figure, Phénomène, Inclusion, Dispersion, Feu, Élément, Luminescence, FormeTaille, Ténacité, Durabilité, Stabilité, Traitement, GemmeSimilaire, ObservationGe, #CodeT, #CodeCa)
- REPRESENTATION (Z, CodeM, CodeGe, Nom, Formule, Gisement, Utilité, Producteur, Couleur)

#### V.4.4. Modèle Physique de Données (MPD)

Le MPD est une représentation de l'organisation des données tenant compte du SGBD qui sera utilisé. En général, celui-ci est présenté sous forme de tables comportant des champs.

Les clés primaires, qui matérialisent les contraintes d'intégrité d'identité des tables contrôlées par le SGBD seront soulignés.

Quant aux clés secondaires, elles vont présenter les contraintes d'intégrité référentielles, et seront soulignées par des traits discontinus, ou précédées par un dièse (#).

Dans la figure ci-dessous, les clés primaires vont être précédées par l'abréviation « Prk » (Primary Key) et les secondaires par « Frk » (Foreign Key).



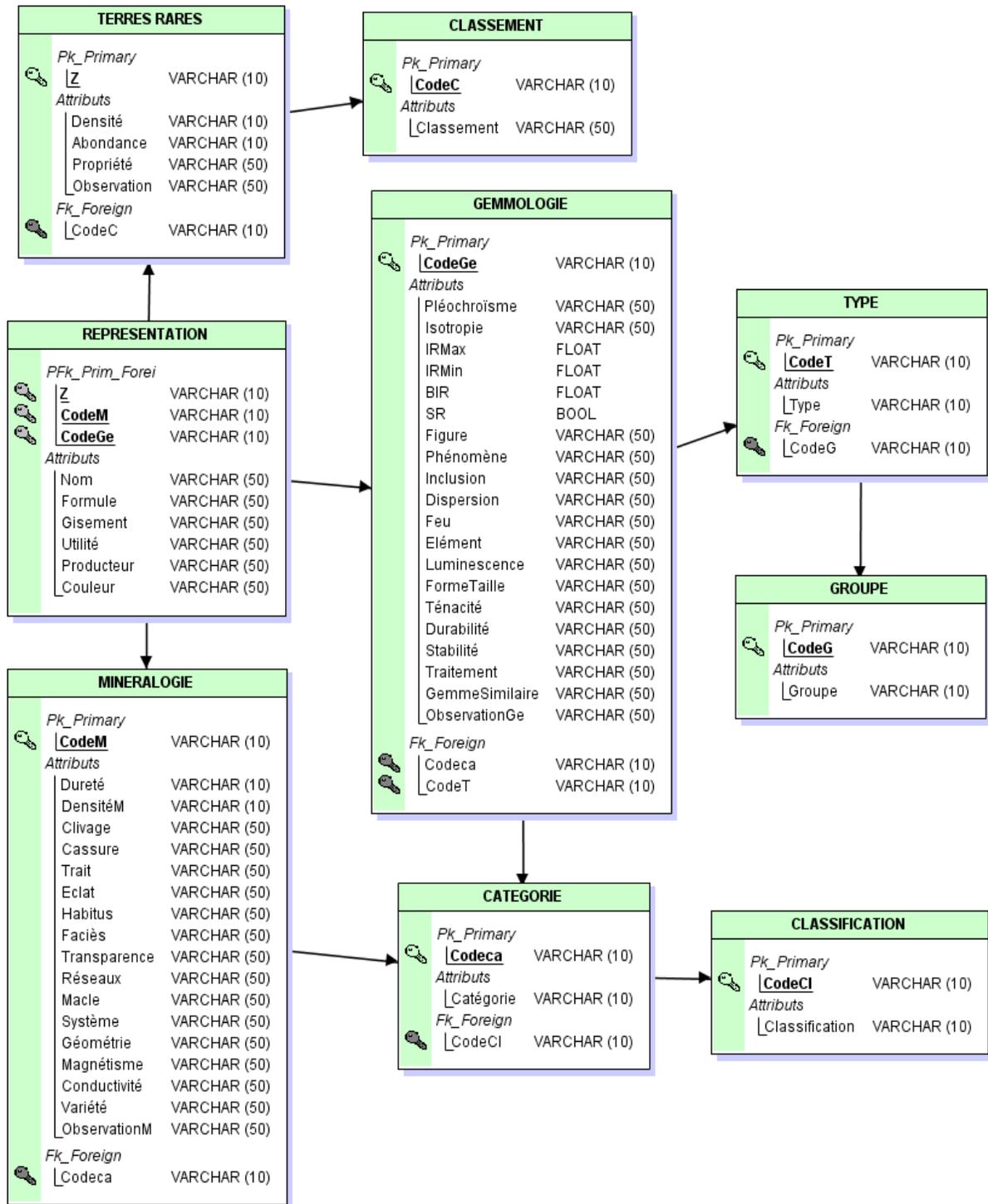


Figure 14: MPD



#### V.4.5. Modèle Conceptuel des Traitements (MCT)

En général, l'activité effectuée autour du présent progiciel sera regroupée en cinq opérations comportant chacune une succession d'actions dont :

❖ Opération : RECHERCHE :

- Choix de la propriété motrice de la recherche ;
- Recherche dans la base de données ;
- Affichage du résultat.

❖ Opération : AJOUT :

- Saisie des nouvelles informations ;
- Ajout dans la base de données.

❖ Opération : MODIFICATION :

- Recherche dans la base de données ;
- Modification du résultat obtenu ;
- Mise à jour de toute information.

❖ Opération : SUPPRESSION :

- Recherche dans la base de données ;
- Suppression des informations obtenues de la base de données.

❖ Opération : IMPRESSION :

Impression du résultat obtenu.



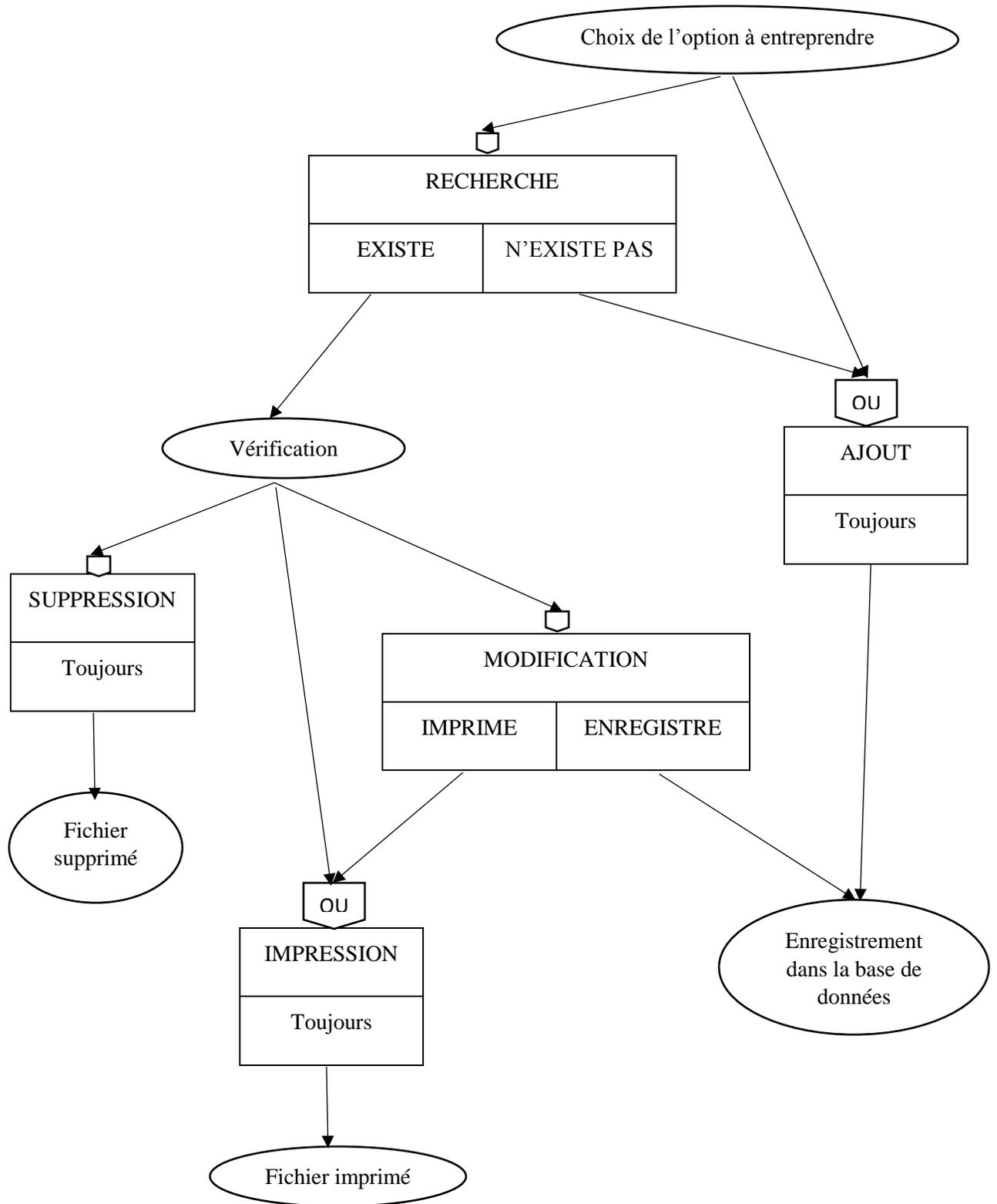


Figure 15: MCT



## CHAPITRE VI : REALISATION ET MISE EN ŒUVRE DU PROGICIEL

### VI.1. Raison du choix de WinDev



Figure 16: Fenêtre d'accueil de WinDev 20

WinDev inclut en standard un ensemble d'éditeurs qui composent l'Atelier de Génie Logiciel. Il fonctionne selon un mode différent des autres langages car les fenêtres et états sont créés à l'aide d'un éditeur visuel qui crée un objet WinDev (fenêtre ou état). Cet objet sera ensuite utilisé par l'application et effectue directement un grand nombre de traitements comme masque, tests de saisie, lien avec les bases de données, gestion des différentes langues, effets visuels, messages d'aide, etc.

En outre, WinDev utilise son propre langage de programmation, le WLangage, ressemblant beaucoup à du pseudocode par son côté langage naturel qui facilite la lecture du code. La

programmation s'effectue directement dans les objets, en saisissant directement le code dans les événements proposés.

WinDev gère de nombreux SGBD, que ce soit par l'intermédiaire des protocoles ODBC ou OLE DB ou par accès natif. Mais WinDev comporte aussi son propre SGBD appelé HFSQL (HyperFileSQL). Ce dernier existe en version locale et client/serveur, sous Windows, Linux, Android et iOS. De plus, la diffusion du moteur de base de données est libre pour les projets réalisés en WinDev, quelle que soit la taille des bases, et le nombre de moteurs diffusés.

## VI.2. Présentation du progiciel

### VI.2.1. Tables

Une table est une feuille tabulaire dont les colonnes et lignes correspondent à celles définies en MPD. Donc, c'est l'informatisation du MPD. Tous les autres outils ne peuvent être exécutés qu'après création d'une table au moins. Pour ce projet, onze tables ont été créées, dont :

- classement
- terres rares
- classification
- catégorie
- type
- groupe
- gemmologie
- minéralogie
- représentation
- traitement
- login



### VI.2.2. Requêtes

Les requêtes constituent les opérations entreprises par les utilisateurs sur les tables en termes de recherche et demande des données. Une requête est alors impérativement caractérisée par les conditions et les tris envisagés par les utilisateurs. WinDev dispose de quelques types de requêtes dont :

- **requête sélection** : permettant de sélectionner des enregistrements ;
- **requête ajout** : permettant d'ajouter un enregistrement ;
- **requête modification** : permettant de modifier un enregistrement ;
- **requête code SQL** : la requête sera saisie directement en code SQL ;
- **requête union** : permettant de réunir le résultat de plusieurs requêtes ;
- **requête suppression** : permettant de supprimer des enregistrements.

### VI.2.3. Formulaires

Un formulaire est une interface entre l'utilisateur et les tables et requêtes. Ce dernier facilite l'intervention d'un utilisateur sans qu'il soit « expert » en structuration de base de données. Ainsi, l'opération de saisie et l'affichage des résultats de recherches peuvent être effectués directement à travers cette interface.

Ce projet comporte plusieurs formulaires. Les figures suivantes présentent quelques-uns d'entre eux.

#### VI.2.3.1. Formulaire d'accueil

Cette fenêtre permet d'insérer le nom de l'utilisateur et le mot de passe y afférent, ainsi, le bouton :

- « OK » permet d'accéder au menu principal du progiciel si les informations insérées sont cohérentes ;
- « Annuler » ferme la fenêtre ;
- « Changer le mot de passe » est destiné pour cette action.



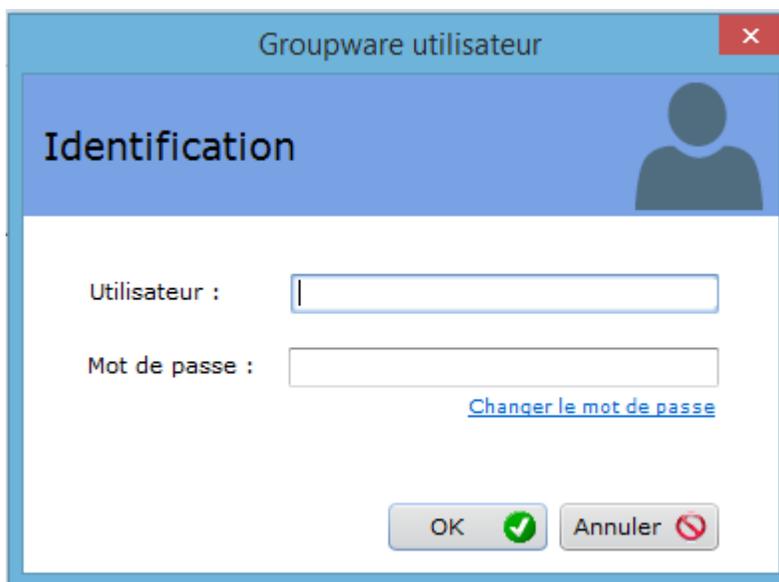


Figure 17: Fenêtre d'accueil du progiciel

#### Code du bouton « OK »

```
HLitPremier (LOGIN)
TANTQUE PAS HEnDehors (LOGIN)
    SI SUtil=LOGIN.Utilisateur ET SMot=LOGIN.Mot ALORS
        Ouvre(FMenu)
        Ferme(FLogin)
    SINON
        Erreur ("Mot de passe incorrect")
    FIN
HLitSuivant(LOGIN)
FIN
```

#### VI.2.3.2. Formulaire de menu

Le formulaire contient trois onglets permettant d'accéder à différentes fenêtres du projet.

- L'onglet « Accueil » comporte trois volets dont :
  - « Liste » : conduit au formulaire contenant la liste des minéraux déjà enregistrés dans la base de données, que ce soit un minéral ou une gemme ou un élément de terre rare ;
  - « Aide » : comporte un guide d'utilisation du progiciel ;
  - « Quitter » : pour fermer le progiciel.

MENU

Accueil    Insertion    Recherche

Liste    Aide    Quitter

Minerals list

Norm	Formule	Variété	Localisation	Gisement	Usages	Couleur
Graphite	C	Cliftonite	Ambatolampy, Ampamihy, Ambatom	Sédiments de métam	Domaine industriel (produits)	Gris métallique; gris foncé; noir
Gypse	CaSO4·2H2O	gypse lamelleux, albâtre gypseux	Ankay/Mahazoma	Évaporites,	Cimenterie, isolants	Incolore, mais aussi de blanc à gris
Chrysoberyl	BeAl2O4	Alexandrite, Cymophane ou oeil de chat	Antsofimbato, Vallée de Sahatany, Anka	pegmatites, roches mé	joaillerie, le laser à alexandrite e	Jaune, vert jaune, brun vert à brun
Chromite	FeCr2O4	Alumochromite, Alumoberezovite		Minéral accessoire des		Noir ; brun noir ; brun
Néodyme	Nd		Chine (91 %), États-Unis (4 %)		Aimants, lasers, catalyseurs au	Blanc argenté
Cérium	Ce		Chine (84 %), États-Unis (8 %)		Catalyseurs automobiles; raffina	Blanc argenté
Scandium	Sc		Chine, Kazakhstan, Russie, Ukraine		Piles à combustible, alliages d'al	Blanc-argenté
Corindon	Al2O3	Rubis (rouge à rouge rosé, rouge	Moramanga, Vatomandry, Antanifotsy	Roches éruptives déficit	Abrusif, pierre précieuse	Rouge, bleu, incolore, rose, jaune,

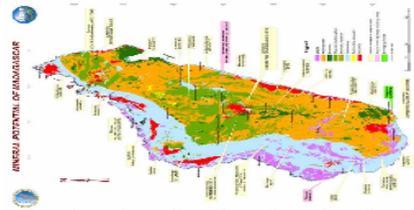


Figure 18: Fenêtre liste des minéraux



- L'onglet « Insertion » est composé de trois volets menant chacun aux formulaires d'ajout d'un minéral ou d'une gemme ou d'un élément de terre rare.

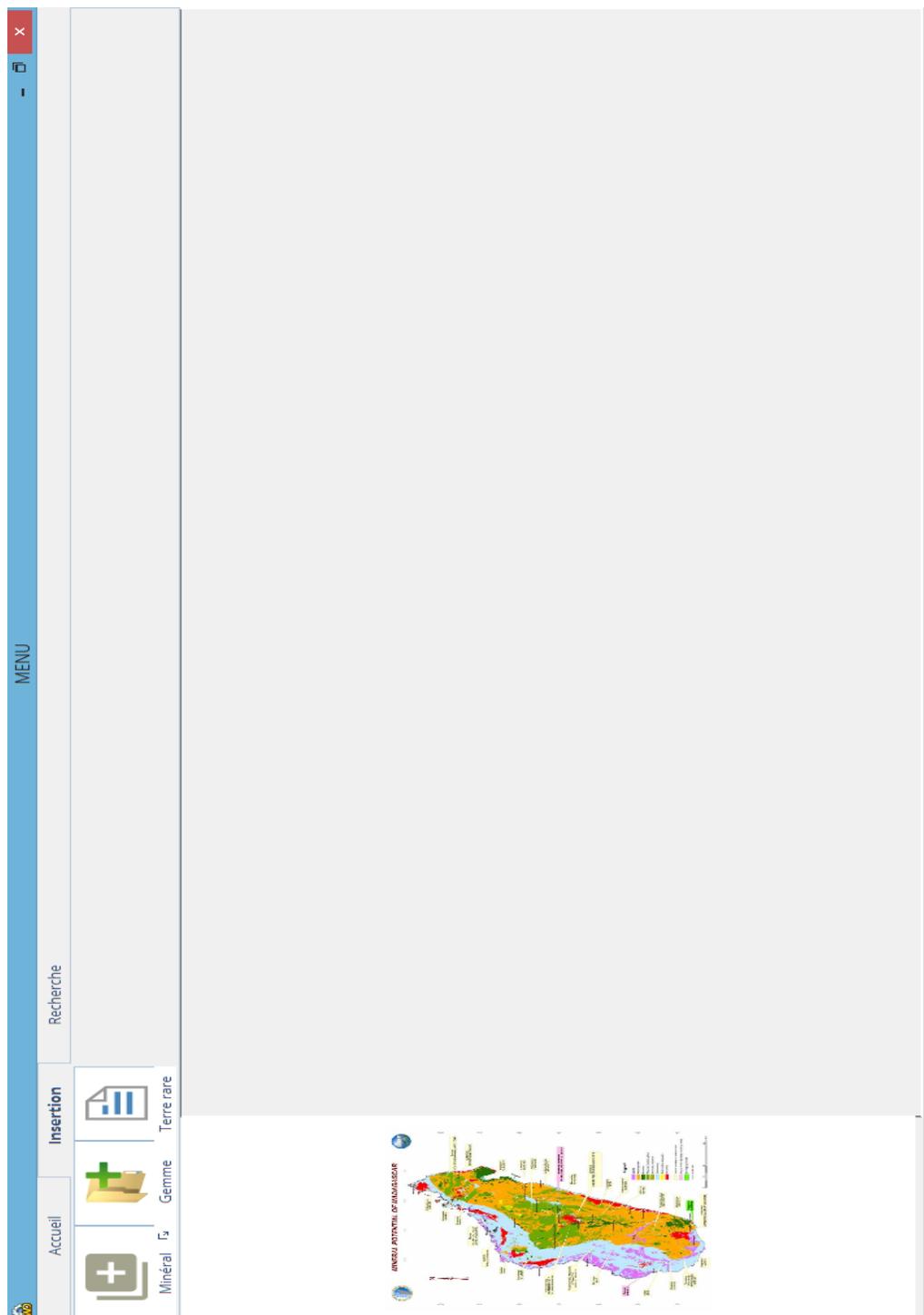


Figure 19: Onglet «Insertion » de la fenêtre menu



- L'onglet « Recherche » contient deux volets dont :
  - « Tous » : conduit au formulaire de recherche des données enregistrées dans la base. Cette action peut se faire soit selon le nom de la matière, soit suivant son formule ou le gisement dans lequel elle est déposée, soit selon son usage ou la localité dans laquelle elle a été trouvée, soit suivant son couleur.
  - « Gemme » : permet de rechercher des gemmes selon leur indice de réfraction, leur figure optique, les phénomènes optiques et inclusions, ou selon l'isotropie ou anisotropie.

Normalement, le résultat s'affiche immédiatement dans le tableau dès la sortie de la zone de texte, moteur de la recherche. Mais lors d'une recherche multiple, c'est-à-dire, dans plusieurs zones de textes, il faut appuyer sur le bouton « Rechercher ».

Afin de visualiser les caractéristiques de la matière recherchées, double cliquer sur la ligne du tableau et le résultat s'affiche sur un autre formulaire. Ce dernier contient quatre boutons :



De gauche à droite, ces boutons servent respectivement :

- MODIFICATION : à la modification des informations existantes ;
- IMPRIMER : à imprimer l'Etat ;
- FERMER : à quitter la fenêtre ;
- AJOUT : permet d'accéder à un autre formulaire pour l'ajout des données ;
- CHOISIR : pour choisir l'image correspondant à la matière dans un répertoire.

*Rapport-gratuit.com*   
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

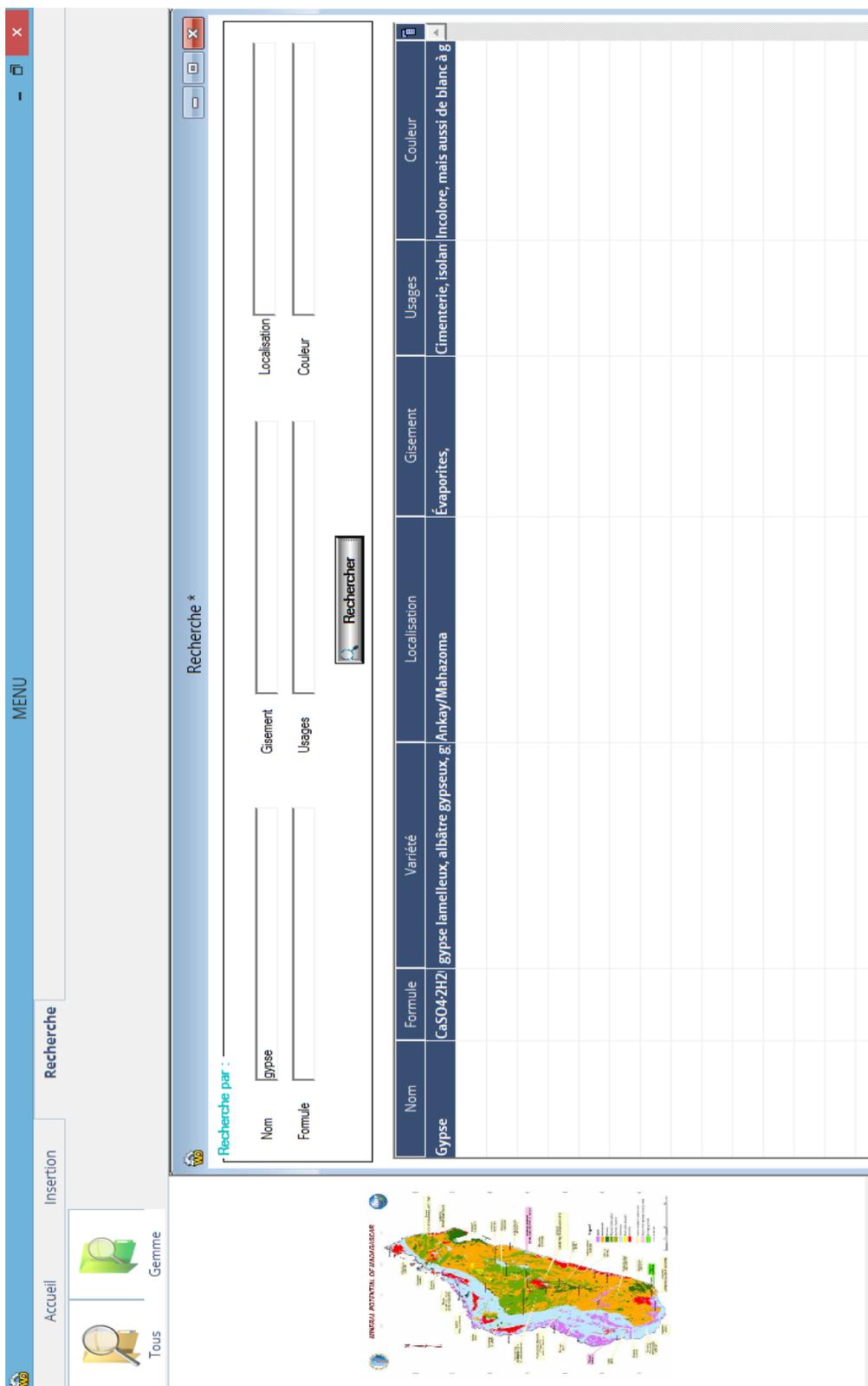


Figure 20: Onglet «Recherche » et formulaire de « Tous »



TERRE RARE

✕  
□  
—

N° atomique

Formule

Nom ETR

Groupe

Densité

Abondance (ppm)



CHOISIR

Propriétés

Couleur

Observation

Producteur

Gisement

Usages

↻

🖨

✕

Figure 21: Fenêtre de modification de terre rare



#### VI.2.4. Etats

L'état sert à la création des versions imprimables des données. Ils proposent diverses formes de la page à imprimer selon le choix. Sous WinDev, quelques types existent :

- *état vierge* : aucun champ ne sera généré par cet assistant ;
- *état tableau* : imprime une ligne de tableau pour chaque donnée lue ;
- *état planning* : imprime un planning ;
- *état étiquette* : imprime une étiquette pour chaque donnée lue ;
- *état multicolonne* : état tableau ou fiche présenté sur plusieurs colonnes ;
- *état fiche* : imprime une liste d'informations pour chaque donnée lue ;
- *état tableau croisé* : imprime un tableau contenant une case par donnée lue ;
- *état mailing* : imprime une lettre pour chaque donnée lue ;
- *état sur formulaire* : impression sur un formulaire pré-imprimé ;
- *état composite* : état composé de plusieurs sous-états.

Pour le présent progiciel, les états sont tous créés à partir d'un état vierge.

#### Code de l'état d'un minéral

```
RUB_id= FEN_MINERALOGY_edit.SAI_id  
RUB_cod= FEN_MINERALOGY_edit.SCodeP  
RUB_Nom= FEN_MINERALOGY_edit.SNom  
RUB_For= FEN_MINERALOGY_edit.SFormu  
RUB_Cat= FEN_MINERALOGY_edit.CCateg  
RUB_classe= FEN_MINERALOGY_edit.SClass  
RUB_Sys= FEN_MINERALOGY_edit.SSys  
RUB_geo= FEN_MINERALOGY_edit.SGeo  
RUB_dur= FEN_MINERALOGY_edit.SDur  
RUB_dens= FEN_MINERALOGY_edit.SDens  
RUB_cass= FEN_MINERALOGY_edit.SCass  
RUB_im= FEN_MINERALOGY_edit.SAI_IMAGE  
IMG_im=RUB_im
```





## CHRYSOBERYL



<b>Formule</b>	BeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
<b>Catégorie</b>	Oxydes et hydroxydes
<b>Classe</b>	Minéraux non silicatés
<b>Type</b>	Pierres semi-précieuses
<b>Groupe</b>	Matériaux naturels

### Propriétés physiques

<b>Système cristallin</b>	Orthorhombique
<b>Classe cristalline</b>	Orthorhombique dipyramidal
<b>Dureté</b>	8.5
<b>Densité</b>	3,71 - 3,75
<b>Cassure</b>	Conchoïdale
<b>Clivage</b>	Faible à modéré
<b>Réseaux de Bravais</b>	
<b>Trait</b>	Blanc
<b>Eclat</b>	Vitreux brillant
<b>Habitus</b>	Cristaux tabulaires épais ou maclés, libres et inclus
<b>Faciès</b>	
<b>Macle</b>	Très commun sur {130}
<b>Magnétisme</b>	Aucun
<b>Radioactivité</b>	Aucune
<b>Tenacité</b>	Excellente à bonne
<b>Stabilité</b>	Très bonne
<b>Durabilité</b>	



### Propriétés optiques

<b>Transparence</b>	Transparent à translucide
<b>Anisotropie</b>	Anisotropic
<b>IR minimal</b>	1.74
<b>IR maximal</b>	1.76
<b>Biréfringence</b>	0,009
<b>Figure optique</b>	Biaxial (+)
<b>Pléochroïsme</b>	Très pléochroïque et montre des couleurs verte, orange ou rouge pourpré
<b>Inclusion</b>	Plans de macle parallèles, inclusions cristallines, diphasées et triphasées, givre de guérison
<b>Dispersion</b>	Faible
<b>Feu</b>	
<b>Couleur</b>	Jaune, vert jaune, brun vert à brun rougeâtre, brun, incolore
<b>Élément colorant</b>	Cr <sup>3+</sup> (vert), Fe <sup>3+</sup> (jaune pâle)
<b>Phénomène optique</b>	Chatoyance et effet alexandrite (vert à vert bleuté en lumière du jour, rouge ou rouge pourpré en lumière incandescente)
<b>Forme de la taille</b>	Cabochon (cymophane)
<b>Luminescence</b>	Rouge pâle pour l'alexandrite (UV)

### Autres

<b>Variété</b>	Alexandrite, Cymophane ou oeil de chat
<b>Gemme similaire</b>	Idiocrase et corindon (IR similaire)
<b>Traitement</b>	Remplissage-
<b>Observation</b>	
<b>Usages</b>	Joaillerie, le laser à alexandrite est une méthode d'épilation par lumière
<b>Gisement</b>	pegmatites, roches métamorphiques comme les micaschistes. graviers alluvionnaires
<b>Localisation</b>	Antsofimbato, Vallée de Sahatany, Ankazobe, Sakaraha/Ilakaka

*Figure 22: Etat gemme*



## VI.3. Mise en œuvre du progiciel

### VI.3.1. Rapport

La mise en œuvre du progiciel s'est généralement bien déroulée. Un petit souci de résolution d'écran s'est survenu, mais a été ajusté. En outre, la communication des données entre plusieurs utilisateurs est possible. Cette application a été ainsi gérée avec HFSQL du fait que l'accès à la base de données est déjà intégré pour ce type.

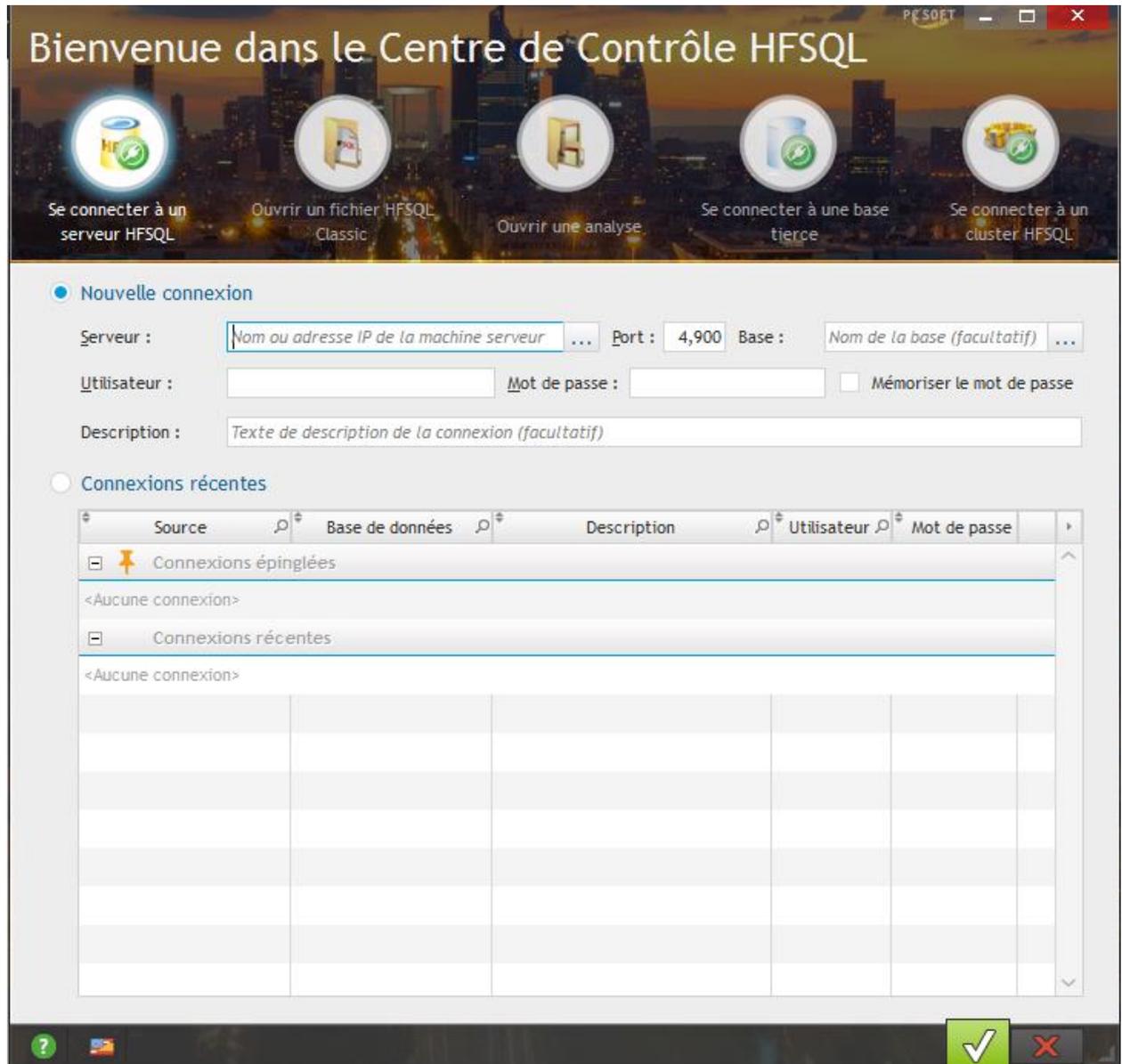


Figure 23: Fenêtre du centre de contrôle de HFSQL

### VI.3.2. Suggestion

Ce progiciel a été conçu pour stocker les données minéralogiques, gemmologiques et les données concernant les terres rares de notre pays. Ainsi, la reconnaissance des minéraux dans différentes localités seraient plus aisée. Cependant, cette information sera plus précise avec une carte représentant les coordonnées exactes de chaque localité ou plus précisément de chaque site minier. De ce fait, la combinaison de la base de données avec un système d'information géographique s'avère bénéfique.

En outre, les caractéristiques et renseignements donnés sur chaque minéral ne sont pas forcément suffisant afin de les reconnaître sans hésitation. Ainsi, la base de données pourrait être enrichie avec d'autres informations telles la pétrographie des roches encaissantes, la cristallographie des minéraux cristallins, ...



## CONCLUSION

Les minéraux occupent une place importante dans la vie des hommes. Que ce soit directement, ou après quelques transformations ou encore suite à l'extraction de certains métaux, ces derniers resteraient une source importante des substances utiles au bienfait de la vie courante et au développement même d'un pays, sans parler des terres rares qui sont aux cœurs de toutes les technologies de pointes de nos jours. De ce fait, avoir certaines informations sur ces substances s'avère bénéfique afin de pouvoir entamer leurs exploitations.

L'intérêt pour les terres rares, ces 17 métaux aux propriétés uniques, s'est fortement accru ces dernières années. Elles sont en effet considérées comme « critiques » par les plus grandes puissances mondiales en raison de leur importance pour l'économie et les technologies vertes, et du risque de pénurie d'approvisionnement qui les entoure. Sous l'effet de la demande croissante pour ces éléments, des problèmes d'accès à la ressource et de l'augmentation des prix, plusieurs gouvernements et industries sont partis à la recherche de nouveaux gisements hors Chine susceptibles de répondre à leurs besoins.

Madagascar, un pays reconnu comme étant une des sources majeures sur le plan mondial des pierres fines et précieuses, possède aussi des minéralisations en métaux rares. Chaque minéral et gemme possèdent des propriétés spécifiques leurs offrant une grande importance dans plusieurs domaines. L'étude de ces différentes propriétés fera l'objet de la minéralogie et de la gemmologie. Ce progiciel est conçu spécialement pour ces deux domaines, ainsi que les éléments de terres rares. De ce fait, ce dernier peut servir de base de données sur les réserves minérales dans le sous-sol de la Grande Ile, mais les autres minéraux existants dans le monde pourraient aussi y être stockés, selon le besoin de l'utilisateur.

Cependant, une bonne connaissance géologique du pays est nécessaire pour la bonne gestion du territoire, et sur le plan minier, celle-ci est une condition sine qua non pour susciter l'intérêt des investisseurs. C'est pourquoi l'acquisition de données, leur diffusion et promotion, l'actualisation de celles-ci en fonction de l'évolution des techniques disponibles et des tendances du marché sont indispensables pour promouvoir l'activité minière. De ce fait, la disposition d'une base de données géo-scientifique permettant de valoriser le potentiel minéral de Madagascar sera un atout majeur.



## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] HOUTI F.B. « Les minéraux et les roches ».
- [2] Dictionnaire géologique
- [3] BURSA, Turkey. “An Introduction to mineralogy”, Cumhur Aydinalp, Uludag University, on 01 April 2014
- [4] FRANÇOIS FRANGES. « A la découverte des minéraux et pierres précieuses ».
- [5] RAKOTOVAO Soatsitohaina. « Cours de Pétrographie », Licence en Ingénierie Minière 2015, Ecole Supérieure Polytechnique d’Antananarivo.
- [6] PATRICK VOILLOT. « Les pierres précieuses ».
- [7] FREDERIC HATERT, « Cours de Gemmologie et minéralogie analytique », Master 1 en Science géologique (2015 – 2016), Université de Liège.
- [8] RANOROSOA Nadine. « Cours de Gemmologie », Master II en Ingénierie Minière 2017, Ecole Supérieure Polytechnique d’Antananarivo.
- [9] NORA ENGEL. « Cours de gemmologie ».
- [10] NORA ENGEL. «Bréviaire des pierres précieuses », 2009, révisé par Jacques Deferne en 2016
- [11] © CIBJO 2012. “The Gemstone Book”, Coloured Stone Commission 2012-1
- [12] FRIEDEL, Charles (1832-1899), « Cours de minéralogie : minéralogie générale », professé à la Faculté des sciences de Paris par Charles Friedel.
- [13] © L’Ecole des Gemmes. « Cours de présentation des instruments », 2004.
- [14] © 2018 Gemmantia – Paris. « Phénomènes optiques dans les gemmes »
- [15] © 2018 Gemmantia – Paris. « Différentes tailles des pierres précieuses »
- [16] ALAIN ABREAL. « Les couleurs des minéraux », Juillet 2002
- [17] BEN LAHOUCINE NATHALIE. « L’exploitation des terres rares au Groenland : Enjeux et risques pour l’environnement ». Mémoire de Fin d’Etude en vue de l’obtention du grade académique de Master en Sciences et Gestion de l’Environnement, Université Libre de Bruxelles. (2013 – 2014).

[18] Rapport sur les enjeux stratégiques des terres rares et des matières premières stratégiques et critiques, au nom de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques de France, 19 mai 2016

[19] BENOIT GIBERT, « Ressources Minérales et matériaux pour l'énergie », Laboratoire Géosciences Montpellier, Master Energie (2012-2013).

[20] Coup d'œil sur les produits de base – Edition spéciale sur les terres rares. Conférence des Nations Unies sur le Commerce Et le Développement (CNUCED), New York et Genève, 2014.

[21] BGS –British Geological Survey, 2011. “Rare Earth Elements”, 53p

[22] MRN - Ministère des Ressources Naturelles, 2013. « Terres rares : propriétés, usages et types de gisement », In Ressources naturelles Québec. En ligne sur <<http://www.mrn.gouv.qc.ca/mines/industrie/metaux/metaux-proprietes-terres-rares.jsp>>, consulté le 11 novembre 2013.

[23] MASSARI, S. et RUBERTI, M., 2013. « Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies ». Resources Policy, 38 (1), pp. 36-43.

[24] GOLEV, A., SCOTT, M., ERSKINE, P.D., ALI, S.H., BALLANTYNE, G.R., 2014. « Rare earths supply chains: Current status, constraints and opportunities ». Resources Policy, 41 (1), pp. 52-59.

[25] BARREAU, B., HOSSIE, G., LUTFALLA, S., 2013. Approvisionnement en métaux critiques : Un enjeu pour la compétitivité des industries françaises et européennes, Document de travail du Commissariat général à la stratégie et à la prospective, 52p.

[26] Gardarin G., « Bases de données objet et relationnel ». Eryolles (1999).

[27] DI GALLO Frédéric, « Méthodologie des systèmes d'information – MERISE », Cours du cycle probatoire, CNAM ANGOULEME (2000-2001)

[28] TOHIZARA Gentiano Paul. « Création de base de données géoscientifiques de la plaine d'Antananarivo et de ses environs », Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur des Mines, au sein de l'ESPA, promotion 2006.

[29] RANDRIAMIARANTSOA Tolojanahary. « Conception et élaboration de la base de données scientifiques relative au plateau continental de l'extrême sud de Madagascar », Mémoire pour l'obtention de Diplôme d'Etudes Approfondies, option génie Minéral, au sein de l'ESPA, Mai 2012.

[30] Guillaume ESTRADÉ. « Le complexe cénozoïque alcalin d'Ambohimirahavavy à Madagascar: origine, évolution et minéralisations en métaux rares », thèse en vue de l'obtention du doctorat de l'Université de Toulouse.

[31] Saholy RAKOTOSAMIZANANY. « Les gisements de corindons gemmes dans les basaltes alcalins et leurs enclaves: Signification Pétrographique et Métallogénique », thèse pour obtenir le grade de Docteur en Sciences de la Terre et de l'Univers, le 19 Juin 2009.

[32] Microsoft® Encarta® 2009. © 1993-2008 Microsoft Corporation.

## WEBOGRAPHIE

- [33] <https://www.gemperles.com/gemmes>, consulté le 25 octobre 2018.
- [34] <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s2/r.ign.html>, consulté le 10 octobre 2018.
- [35] <http://globalmetal.fr/metaux-strategiques/>, consulté le 10 octobre 2018.
- [36] <https://www.geminterest.com/imitations.php>, consulté le 25 octobre 2018.
- [37] <https://www.geminterest.com/traitement.php>, consulté le 25 octobre 2018.
- [38] <https://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/Chimie/01/06- Etat solide/deug/bravais.html>, consulté le 01 novembre 2018.
- [39] <http://www.gems-plus.com/gemmes/quartz-mystique.php>, consulté le 01 novembre 2018.
- [40] <http://charliesgems.fr/186-opale-welo-135-cts.html>, consulté le 01 novembre 2018.
- [41] Dossier enjeux des géosciences - les terres rares, janvier 2017. En ligne sur <http://www.brgm.fr>, consulté le 10 octobre 2018.
- [42] HIVER 2016, « Les terres rares : des métaux aux risques encore incertains ». En ligne sur <http://www.ficsum.com>, consulté le 10 octobre 2018.
- [43] <https://www.commentcamarche.com/contents/105-les-modeles-de-sgbd>, consulté le 04 novembre 2018.
- [44] <http://e-ressources.univ-avignon.fr/sgbd/co/hierarchique.html>, consulté le 04 novembre 2018.
- [45] <http://e-ressources.univ-avignon.fr/sgbd/co/reseau.html>, consulté le 04 novembre 2018.

# ANNEXES

## ANNEXE 1 : STRUCTURE CRISTALLINE

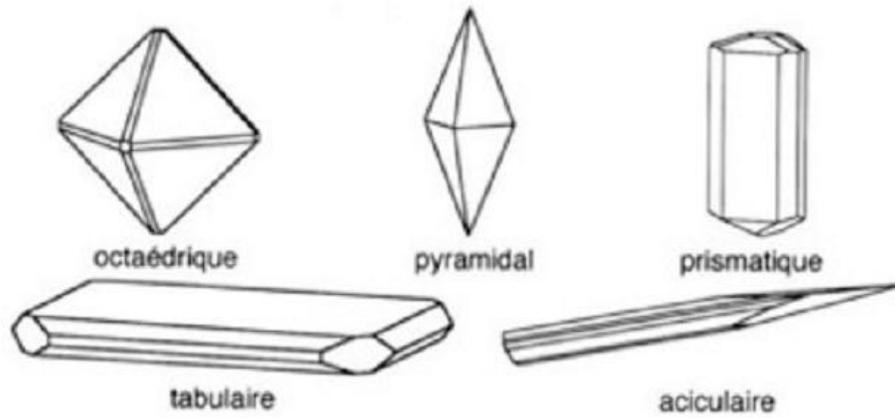


*Oeil-de-tigre*

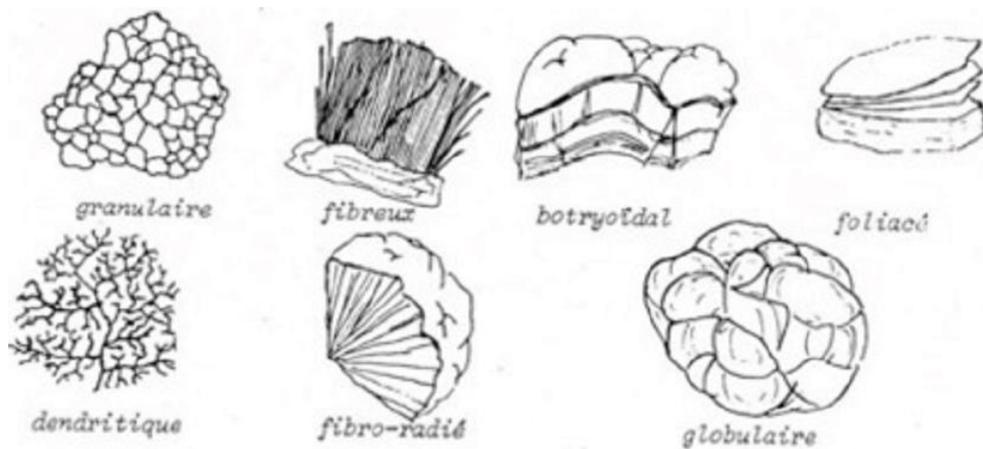


*Ammonite pyritisée*

*Exemples de cristaux pseudomorphes [9]*



*Habitus suivant la forme cristalline dominante [9]*



*Habitus suivant l'agencement d'un agrégat [9]*

## ANNEXE 2 : CARACTERES DE RECONNAISSANCE DES MINERAUX

° Mohs	Minéraux typiques	Rayables à	rayé à l'ongle	rayé au cuivre	rayé au couteau	rayé à la lime
1	talc, soufre	friable à l'ongle	↓	↓	↓	↓
2	gypse, ambre, sel gemme	l'ongle		↓	↓	↓
3	calcite, corail, ivoire	pièce de monnaie (cuivre)			↓	↓
4	fluorite, magnésite	fer blanc				↓
5	apatite, turquoise	lame de couteau				↓
6	feldspath orthose	la lime				↓
7	quartz, olivine	raye le verre				↑
8	topaze, spinelle	raye le quartz				
9	corindon	raye le topaze				
10	diamant	raye tous les matériaux				

*Echelle de dureté*



*macle en croix de la staurotide.*



*fluorine, macles par interpénétration*



*rubis (Mysore, Inde), macles polysynthétiques (en fines lamelles).*

*Exemples de cristaux maclés [9]*

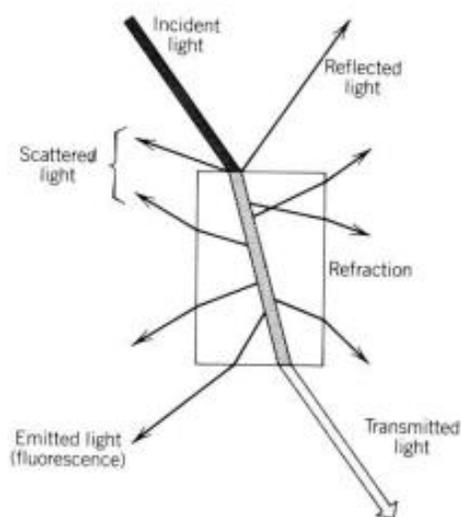
### ANNEXE 3 : LA COULEUR DES GEMMES

La couleur des gemmes est une de leurs caractéristiques les plus importantes. Cette couleur est d'ailleurs le critère majeur qui permet d'identifier visuellement les gemmes. Mais quelles sont exactement les facteurs qui régissent la couleur des minéraux ?

#### Interactions entre les minéraux et la lumière visible

La couleur est la réponse de l'œil aux radiations électromagnétiques du spectre visible. Cette lumière visible couvre une gamme de longueurs d'ondes comprise entre 350 nm (violet) et 750 nm (rouge).

Lorsque la lumière blanche rencontre la surface d'un minéral, elle peut être transmise, diffusée, réfléchie, réfractée ou absorbée. Les processus de réflexion et de diffusion sont partiellement responsables de l'éclat d'un minéral. Lorsque la lumière ne subit aucune absorption, le minéral est incolore, en lumière transmise comme en lumière réfléchie. Par contre, le minéral est coloré quand certaines longueurs d'ondes sont absorbées ; la couleur perçue résulte alors de la combinaison des longueurs d'ondes transmises qui arrivent à l'œil de l'observateur.



*Interaction de la lumière avec les minéraux [7]*

Les absorptions observées dans la région visible du spectre électromagnétique sont causées par des transitions électroniques. Comme nous le savons, les électrons ne peuvent occuper que des niveaux d'énergie distincts, appelés quanta. Entre les différents niveaux énergétiques des électrons localisés autour des atomes, il y a donc des différences énergétiques bien définies. Lorsqu'une radiation électromagnétique interagit avec un minéral, les radiations dont les longueurs d'ondes correspondent à la différence énergétique entre deux niveaux électroniques sont absorbées, permettant ainsi à l'électron de passer du niveau énergétique inférieur vers le niveau supérieur. Pour les minéraux colorés, la différence énergétique entre deux niveaux électroniques se situe dans la gamme du spectre visible.

Trois processus principaux gouvernent la couleur des minéraux. Il s'agit des transitions de champ cristallin (« crystal field transitions »), des transitions moléculaires orbitales (transferts de charge), et des transitions liées à la présence de centre de couleurs. Ces différents phénomènes vont être abordés successivement ci-dessous.

### Les transitions du champ cristallin

Les transitions de champ cristallin sont des transitions entre les orbitales 3d partiellement vides des éléments de transition. Ces transitions sont les plus fréquentes dans les minéraux contenant les éléments de transition Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni et Cu. Les électrons présents dans les orbitales 3d partiellement remplies peuvent être excités par des quanta d'énergie correspondant aux énergies du spectre visible ; les transitions entre ces différents niveaux énergétiques produisent ainsi une coloration.

Lorsqu'un métal de transition est dans un environnement non coordonné, les électrons localisés sur ses orbitales 3d présentent le même niveau énergétique et ne sont pas dans un état excité. Par contre, si ce cation est entouré par un nuage sphérique de charges négatives, le niveau énergétique des 5 orbitales va augmenter simultanément, à cause de la répulsion des charges négatives environnantes qui vont augmenter l'énergie potentielle des électrons. Dans ces deux cas, un seul niveau énergétique existe pour les électrons, et aucune transition n'est possible, par conséquent, aucune couleur ne sera observée.

Tableau des éléments responsables des couleurs des minéraux <sup>[16]</sup>

Cation métallique	Couleur	Minéraux
Ti <sup>3+</sup> octaédrique	Rose rouge	Phlogopite, Augite, Grenat, certaines tourmalines Quartz rose (Ti <sup>4+</sup> est réduit en Ti <sup>3+</sup> sous l'effet de radiation)
V <sup>3+</sup> octaédrique	Vert	Grenat grossulaire (tsavorite) Certaines cyanites Emeraude vanadifères Corindon (effet alexandrite)
V <sup>4+</sup> octaédrique	Vert à bleu	Anatase bleu Apophyllite verte (Zoisite (tanzanite) avec V <sup>3+</sup> )
Cr <sup>3+</sup> octaédrique	Vert  Effet alexandrite :  avec fluorescence rouge	Béryl émeraude, grenat ouvarovite, mica fushite, diopside verte chrysobéryl (alexandrite)  rubis, spinelle, topaze violet Alexandrite
Cr <sup>3+</sup> tétraédrique	Rouge	Spinelle
Cr <sup>4+</sup> octaédrique	Bleu	Diopside bleue
Mn <sup>3+</sup> octaédrique	Rouge profond Béryl rouge Couleur verte Couleur violette	Purpurite, manganophyllite, certaines rubellite. Béryl Andalousite Trémolite
Mn <sup>2+</sup> octaédrique	Rose rouge avec fluorescence orange Rose orangé Jaune vert	Rhodonite, rhodocrosite, morganite, kunzite,  Grenat spessartite Natrophyllite Manganosite
Mn <sup>2+</sup> tétraédrique	jaune vert	<b><u>Willémité</u></b>
Fe <sup>3+</sup> octaédrique	Jaune Rouge violet Couleur pâle lorsque les ions Fe <sup>3+</sup> sont isolés les uns des autres par des ions silicates Couleur rose pâle	Beryl héliodore Strengite  Phosphates, ex : strengite

	Couleur rose pâle Couleur jaune vert dans les silicates ferriques	Sulfates, ex: coquimbite Grenat Andradite
Fe <sup>3+</sup> tétraédrique	jaune pâle	Feldspaths plagioclases Chrysobéryl ferrifère
Fe <sup>2+</sup> octaédrique	Vert Avec Fe++ en excès, la couleur peut virer au brun	Ferromagnésien (péridot, épidote, vésuvianite) tourmaline verte Béryl Forsterite Phosphophyllite Fayalite, orthopyroxène
Fe <sup>2+</sup> cubique	Rouge	Grenat almandin, pyrope
Fe <sup>2+</sup> pyramidal (plan carré)	rouge	Llepsite, Eudyalite
Co <sup>2+</sup> octaédrique	Rose	Erythrine, sphaerocalcite, cobaltocalcite, cobaltoadamine, rosellite
Co <sup>2+</sup> tétraédrique	Bleu	Spinelles bleues, lussakite (staurolite cobaltifère)
Ni <sup>2+</sup> octaédrique	Verte jeune dans des sites déformés par des gros Ni++ en substitution	Garniérite, annabergite, chrysoprase
Cu <sup>2+</sup> octaédrique	Vert  bleu	Malachite, diopside, olivenite, libethenite, atacamite Azurite, chrysocolle, turquoise, Aurichalcite
Sc <sup>3+</sup>	Pas de coloration	
U <sup>4+</sup>	bleu	Zircon

Ces éléments de transition sont appelés éléments chimiques **chromatophores**. Lorsqu'ils sont inclus dans la formule chimique de la gemme, on parle d'un élément **idiochromatique** (exemple : le péridot (Mg,Fe)<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>) comprend du fer dans la formule chimique ou fer idiochromatique). Lorsqu'une infime fraction d'un élément chromatophore est incluse comme impureté dans la structure cristalline de la gemme, on parle d'élément **allochromatique**. C'est le cas

de la plupart des gemmes dont la plus célèbre, le rubis, est un corindon ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) comprend une infime quantité de chrome dans sa structure cristalline ou chrome allochromatique. [9]

### Les transferts de charge

Les transferts de charges se produisent lorsque les électrons de valence de deux ions adjacents effectuent des transferts d'un cation à l'autre. L'électron n'est donc plus localisé autour d'un seul atome, mais se trouve dans des orbitales moléculaires partagées entre deux cations. Dans un tel cas, la théorie du champ cristallin n'est plus applicable.

Des exemples de transferts de charges sont fréquents dans les minéraux. Parmi ceux-ci, les transferts  $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$  et  $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$  sont particulièrement fréquents, produisant en général une coloration bleue intense.

*Tableau des transferts de charges responsables des couleurs de gemmes courantes*

Ion Pair	Mineral	Formula	Color
$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$	Beryl (aquamarine)	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	Blue-yellow
$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$	Cordierite	$(\text{Mg,Fe})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18} \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Blue
$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$	Corundum (sapphire)	$\text{Al}_2\text{O}_3$	Blue
$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$	Kyanite	$\text{Al}_2\text{SiO}_5$	Blue
$\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Cr}^{6+}$	Crocoite	$\text{PbCrO}_4$	Orange
$\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$	Beryl (heliodore)	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	Yellow

\*From Loeffler, B. M. and Burns, R. G., 1976, Shedding light on the color of gems and minerals. *American Scientist*, v. 64, pp. 636–647.

### Les centres de couleur

Les défauts présents dans la matière peuvent également être responsables de la coloration. Ces défauts habituellement appelés centres colorés ou centres F (de l'allemand Farbe= couleur), peuvent être principalement de deux ordres :

- cet ion peut être piégé soit dans un site lacunaire en ion ou dans un défaut de Frenkel ou dans une impureté interstitielle ;

- la substitution d'un cation par un autre de degré d'oxydation inférieur suivi par l'éjection d'un électron provenant d'un anion adjacent peut provoquer l'apparition de trous. Ces mouvements de saut de l'électron entre ses niveaux d'énergie causent la coloration, en absorbant la lumière dans le visible. <sup>[16]</sup>

*Tableau des couleurs de gemmes liées à la présence de centre de couleur*

<b>Mineral</b>	<b>Color</b>
Amethyst, fluorite	Purple
Smoky quartz	Brown to black
Irradiated diamond	Green, yellow, brown, blue, pink
Natural and irradiated topaz	Blue
Halite	Blue and yellow

\*From Nassau, K., 1978, The origins of color in minerals. *American Mineralogist*, v. 63, pp. 219–229.

#### *Autres causes de coloration*

Une autre cause possible, provoquant la coloration d'un minéral, est la présence d'inclusions. Le quartz peut être vert, à cause de chlorite en inclusions fines, ou rose à cause d'aiguilles de dumortièreite  $[(Al, \square)Al_6BSi_3O_{16}(O, OH)_2]$ . La calcite contenant des oxydes de manganèse est noire, et l'hématite donne sa pigmentation rouge à de nombreuses variétés, notamment le jaspé.

## ANNEXE 4 : PROPRIETES DES MINERAUX GEMMES

*Tableau des gemmes et leurs dénominations les plus courantes [10]*

<i>Espèce minérale</i>	<i>Variétés de gemme</i>
<i>Diamant</i>	<i>diamant</i>
<i>Corindon</i>	<i>rubis (rouge) saphir (bleu) saphir jaune, saphir rose, saphir vert, tec..</i>
<i>Spinelle</i>	<i>spinelle rouge, spinelle roses, spinelle bleu. etc..</i>
<i>Béryl</i>	<i>émeraude (vert) aigue-marine (bleu) morganite (rose), héliodore (jaune), goshénite (incolor)</i>
<i>Topaze</i>	<i>topaze impériale (brun madère), topaze bleue</i>
<i>Tourmalines</i>	<i>dravite (noir à brun) schorlite (noire), achroïte (incolor) elbaïte (teintes fades), rubellite (rouge à rose), verdelite (vert), indigolite (bleu), tourmaline jaunes, tourmaline bicolore, paraïba (vert anis).</i>
<i>Groupe des grenats Pyrope Almandin Grossulaire Spessartine Andradite Ouvarovite</i>	<i>Rhodolite (intermédiaire entre la pyrope et l'almandin)  Démantoïde (vert)</i>
<i>Péridot</i>	<i>péridot</i>
<i>Spodumène</i>	<i>kunzite (rose) hiddenite (vert)</i>
<i>Quartz</i>	<i>cristal de roche (incolor), améthyste (violet), quartz fumé (brun clair à foncé), citrine (jaune)</i>
<i>Calcédoine</i>	<i>calcédoine (incolor), chrysoprase (vert), cornaline (rouge-orangé), onyx (noir), agate (calcédoine rubanée) jaspe (variété de calcédoine mêlée d'argile) aventurine (vert avec inclusions de micas)</i>
<i>Opale</i>	<i>opale noble (incolor mais avec iridescence) hyalaite (transparente, incolor) opale de feu (rouge-orangé)</i>
<i>Feldspaths orthose et microcline  plagioclases</i>	<i>amazonite (variété bleu-vert de microcline) pierre-du-Soleil (rouge-brun avec inclusions d'hématite) pierre-de-lune (variété iridescente d'orthose) labradorite (variété labradorescente de labrador) Maw-Sit-Sit (albite mouchetée, vert-blanc)</i>
<i>Jadéite Néphrite</i>	<i>Appelées communément jade</i>
<i>Gemmes d'origine organique</i>	<i>les perles, la nacre, l'ambre et le corail</i>

Tableau des principaux gisements de gemmes de Madagascar (modifié d'après Milisenda et al., 1996).

No.	Localisation	Pierres gemmes
1	<b>Ambondromifehy</b>	<b>saphir</b>
2	Boriziny	améthyste, agate, jaspe, aigue-marine
3	Mahajanga	spessartite, aventurine, quartz
4	Mitsinjo	célestite
5	Mananara	tourmaline, cristal de roche
6	Tsaranana	améthyste, aigue-marine
7	Andilamena	quartz fumé, quartz rose, rubis
8	Maevatanana	épidote, jaspe
9	Kandreho	cristal de roche, amazonite
10	Ambatondrazaka	morganite, tourmaline, agate, jaspe, labradorite
11	Ankazobe	aigue-marine, chrysobéryl, épidote, diopside,
12	Anjozorobe	cristal de roche
13	Tsiroanomandidy	cristal de roche, quartz rose, quartz fumé
14	<i>Miarinarivo</i>	diopside, <i>saphir</i>
15	<i>Moramanga</i>	quartz rose, <i>rubis</i> , <i>saphir</i>
16	Mahasolo	améthyste
17	Soavinandriana	améthyste, quartz fumé, aigue-marine
18	Ambatolampy	agate
19	<b>Vatomandry</b>	améthyste, <b>rubis</b> , <b>saphir</b>
20	<b>Faratsiho</b>	topaze, diopside, <b>saphir</b>
21	Miandrivazo	bois silicifié
22	Ambohimanambola	orthoclase
23	<b>Antanifotsy/Soamiakatra</b>	<b>rubis</b> , <b>saphir</b> , zircon, almandin
24	Betafo	quartz rose, quartz fumé, cristal de roche, citrine, aigue-marine, morganite, tourmaline, spodumène, almandin, danburite
25	Antsirabe	cristal de roche, quartz rose, aigue-marine, tourmaline, spodumène, agate, almandin
26	Moralambo	rhodonite
28	Mahabo	amazonite, topaze
29	Ambovombe	rhodonite
30	Ambatofihinandrahana	cristal de roche, améthyste, citrine, quartz fumé, dumortière
31	Ambositra	cristal de roche, quartz rose, aigue-marine, tourmaline
32	Mananjary	émeraude
33	Fianarantsoa	aigue-marine, tourmaline, cristal de roche, zircon
34	Ihosy	rhodonite, calcite
35	Ranohira	rhodonite, <i>saphir</i>
36	Vondrozo	cristal de roche, quartz fumé, aigue-marine, tourmaline
37	<i>Betroka</i>	rhodonite, zircon, kornéropine, spinelle, <i>saphir (multicolore)</i>
38	Toliara	cordiérite
39	Betioky	rhodonite, labradorite
40	<i>Bekily</i>	saphir, grenat (pyrope - spessartite - grossulaire vanadifère)
41	Mahabo	topaze
42	Beraketa	opale
43	Gogogogo	<i>rubis</i>
44	<i>Andranondambo</i>	<i>saphir</i>
45	<i>Ejeda</i>	<i>rubis</i> , <i>saphir</i>
46	Ampanihy	rhodonite
47	<i>Amboasary</i>	aigue-marine, <i>saphir</i> , zircon, diopside
48	Tolanaro	rhodonite
49	<i>Sakaraha / Ilakaka</i>	<i>saphir</i> , chysobéryl (œil-de-chat et alexandrite), spinelle, grenat (rhodosite, hessonite), zircon, rubellite, topaze (bleu), spodumène

Tableau des gemmes les plus courantes, classées en fonction de leur indice de réfraction [7]

Gem mineral	Indices of refraction			Optical character	Bi-refringence
Rutile.....	$\omega$ 2.616	$\epsilon$ 2.903		+	0.287
Anatase.....	$\omega$ 2.554	$\epsilon$ 2.493		-	0.061
Diamond.....	$n$ 2.417				
Sphalerite.....	$n$ 2.37				
Cassiterite.....	$\omega$ 1.997	$\epsilon$ 2.093		+	0.096
Andradite.....	$n$ 1.940 ↓				
Zircon.....	$\omega$ 1.931	$\epsilon$ 1.988		+	0.057
Titanite.....	$\beta$ 1.907	$\alpha$ 1.900	$\gamma$ 2.034	+	0.134
Malachite.....	$\beta$ 1.875	$\alpha$ 1.655	$\gamma$ 1.909	-	0.254
Andradite.....	$n$ 1.865 ↑				
Smithsonite.....	$\omega$ 1.849	$\epsilon$ 1.621		-	0.228
Uvarovite.....	$n$ 1.838				
Almandite.....	$n$ 1.830 ↓				
Spessartite.....	$n$ 1.814 ↓				
Spessartite.....	$n$ 1.794 ↑				
Corundum.....	$\omega$ 1.768	$\epsilon$ 1.760		-	0.008
Almandite.....	$n$ 1.766 ↑				
Epidote.....	$\beta$ 1.763 ↓	$\alpha$ 1.729	$\gamma$ 1.780	-	0.051
Azurite.....	$\beta$ 1.758	$\alpha$ 1.730	$\gamma$ 1.838	+	0.108
Benitoite.....	$\omega$ 1.757	$\epsilon$ 1.804		+	0.047
Spinel.....	$n$ 1.75 ↓				
Pyrope.....	$n$ 1.749 ↓				
Chrysoberyl.....	$\beta$ 1.748	$\alpha$ 1.747	$\gamma$ 1.757	+	0.010
Staurolite.....	$\beta$ 1.741	$\alpha$ 1.736	$\gamma$ 1.746	+	0.010
Rhodonite.....	$\beta$ 1.740 ↓	$\alpha$ 1.733	$\gamma$ 1.744	-	0.011
Grossularite.....	$n$ 1.735				
Hyperssthene.....	$\beta$ 1.728 ↓	$\alpha$ 1.715	$\gamma$ 1.731	-	0.016
Rhodonite.....	$\beta$ 1.720 ↑	$\alpha$ 1.716	$\gamma$ 1.728	+	0.012
Cyanite.....	$\beta$ 1.720	$\alpha$ 1.712	$\gamma$ 1.728	-	0.016
Epidote.....	$\beta$ 1.719 ↑	$\alpha$ 1.716	$\gamma$ 1.723	-	0.007
Spinel.....	$n$ 1.718 ↑				
Vesuvianite.....	$\omega$ 1.713	$\epsilon$ 1.705		-	0.008
Diopside.....	$\beta$ 1.708 ↓	$\alpha$ 1.702	$\gamma$ 1.726	+	0.024
Olivine.....	$\beta$ 1.706 ↓	$\alpha$ 1.681	$\gamma$ 1.718	-	0.037
Pyrope.....	$n$ 1.705 ↑				
Zoisite.....	$\beta$ 1.703	$\alpha$ 1.700	$\gamma$ 1.718	+	0.018
Axinite.....	$\beta$ 1.692 ↓	$\alpha$ 1.684	$\gamma$ 1.696	-	0.012
Willemite.....	$\omega$ 1.691	$\epsilon$ 1.719		+	0.028
Axinite.....	$\beta$ 1.685 ↑	$\alpha$ 1.678	$\gamma$ 1.688	-	0.010
Hyperssthene.....	$\beta$ 1.678 ↑	$\alpha$ 1.673	$\gamma$ 1.683	±	0.010
Diopside.....	$\beta$ 1.671 ↑	$\alpha$ 1.664	$\gamma$ 1.694	+	0.030
Enstatite.....	$\beta$ 1.670 ↓	$\alpha$ 1.660	$\gamma$ 1.675	-	0.015
Olivine.....	$\beta$ 1.670 ↑	$\alpha$ 1.653	$\gamma$ 1.689	+	0.036
Spodumene.....	$\beta$ 1.666	$\alpha$ 1.660	$\gamma$ 1.676	+	0.016
Jadeite.....	$\beta$ 1.659	$\alpha$ 1.654	$\gamma$ 1.667	+	0.013
Calcite.....	$\omega$ 1.658	$\epsilon$ 1.486		-	0.172
Euclase.....	$\beta$ 1.656	$\alpha$ 1.653	$\gamma$ 1.673	+	0.020
Dioptase.....	$\omega$ 1.655	$\epsilon$ 1.708		+	0.053
Tourmaline.....	$\omega$ 1.655 ↓	$\epsilon$ 1.633		-	0.022
Phenacite.....	$\omega$ 1.654	$\epsilon$ 1.670		+	0.016
Datolite.....	$\beta$ 1.654	$\alpha$ 1.626	$\gamma$ 1.670	-	0.044
Enstatite.....	$\beta$ 1.653 ↑	$\alpha$ 1.650	$\gamma$ 1.658	+	0.008
Obsidian.....	$n$ 1.65 ↓				
Apatite.....	$\omega$ 1.649	$\epsilon$ 1.644		-	0.005
Tourmaline.....	$\omega$ 1.648 ↑	$\epsilon$ 1.625		-	0.023
Andalusite.....	$\beta$ 1.639	$\alpha$ 1.634	$\gamma$ 1.643	-	0.009

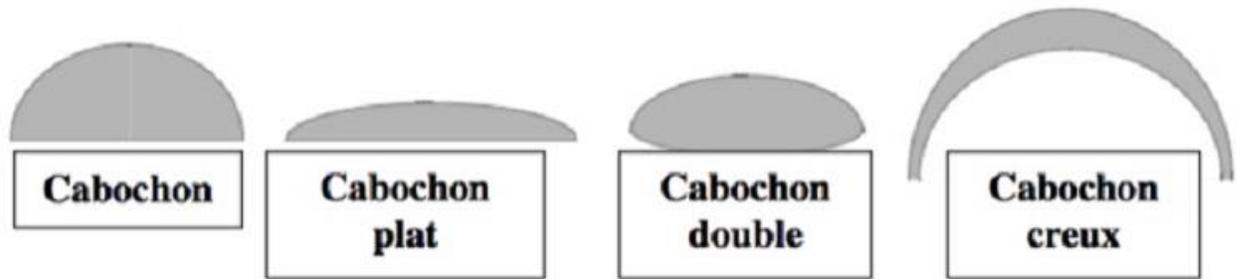
Gem mineral	Indices of refraction			Optical character	Bi-refringence
Lazulite.....	$\beta$ 1.634	$\alpha$ 1.612	$\gamma$ 1.643	—	0.031
Danburite.....	$\beta$ 1.633	$\alpha$ 1.630	$\gamma$ 1.636	—	0.006
Prehnite.....	$\beta$ 1.625	$\alpha$ 1.615	$\gamma$ 1.645	+	0.030
Topaz.....	$\beta$ 1.620	$\alpha$ 1.619	$\gamma$ 1.627	+	0.008
Turquoise.....	$\beta$ 1.62	$\alpha$ 1.61	$\gamma$ 1.65	+	0.04
Nephrite.....	$\beta$ 1.62	$\alpha$ 1.606	$\gamma$ 1.632	—	0.026
Brazilianite.....	$\beta$ 1.605	$\alpha$ 1.598	$\gamma$ 1.617	+	0.019
Beryl.....	$\omega$ 1.598 ↓	$\epsilon$ 1.590		—	0.008
Iolite.....	$\beta$ 1.597 ↓	$\alpha$ 1.592	$\gamma$ 1.599	—	0.007
Steatite.....	$n$ 1.59 ↓				
Variscite.....	$\beta$ 1.584 ↓	$\alpha$ 1.566	$\gamma$ 1.593	—	0.027
Variscite.....	$\beta$ 1.571 ↑	$\alpha$ 1.554	$\gamma$ 1.576	—	0.022
Beryl.....	$\omega$ 1.568 ↑	$\epsilon$ 1.564		—	0.004
Labradorite.....	$\beta$ 1.563	$\alpha$ 1.559	$\gamma$ 1.568	+	0.009
Beryllonite.....	$\beta$ 1.558	$\alpha$ 1.552	$\gamma$ 1.561	—	0.009
Serpentine.....	$\beta$ 1.550 ↓	$\alpha$ 1.546	$\gamma$ 1.557	+	0.011
Quartz.....	$\omega$ 1.544	$\epsilon$ 1.553		+	0.009
Oligoclase.....	$\beta$ 1.543	$\alpha$ 1.539	$\gamma$ 1.547	—	0.008
Steatite.....	$n$ 1.54 ↑				
Amber.....	$n$ 1.54 ±				
Iolite.....	$\beta$ 1.538 ↑	$\alpha$ 1.534	$\gamma$ 1.540	—	0.006
Thomsonite.....	$\beta$ 1.531 ↓	$\alpha$ 1.528	$\gamma$ 1.545	+	0.017
Albite.....	$\beta$ 1.529	$\alpha$ 1.525	$\gamma$ 1.536	+	0.011
Microcline.....	$\beta$ 1.526	$\alpha$ 1.522	$\gamma$ 1.530	—	0.008
Orthoclase.....	$\beta$ 1.524	$\alpha$ 1.518	$\gamma$ 1.526	—	0.008
Gypsum.....	$\beta$ 1.523	$\alpha$ 1.520	$\gamma$ 1.530	+	0.010
Sepiolite.....	$\beta$ 1.525 ±	$\alpha$ 1.519	$\gamma$ 1.529	—	0.010
Moldavite.....	$n$ 1.52 ↓				
Thomsonite.....	$\beta$ 1.513 ↑	$\alpha$ 1.511	$\gamma$ 1.518	+	0.007
Serpentine.....	$\beta$ 1.512 ↑	$\alpha$ 1.508	$\gamma$ 1.522	+	0.014
Lazurite.....	$n$ 1.50 ±				
Sodalite.....	$n$ 1.483				
Moldavite.....	$n$ 1.48 ↑				
Obsidian.....	$n$ 1.48 ↑				
Chrysocolla.....	$\omega$ 1.46 ±	$\epsilon$ 1.57 ±			
Opal.....	$n$ 1.46 ↓				
Opal.....	$n$ 1.44 ↑				
Fluorite.....	$n$ 1.434				

Tableau de dureté de quelques gemmes [8]

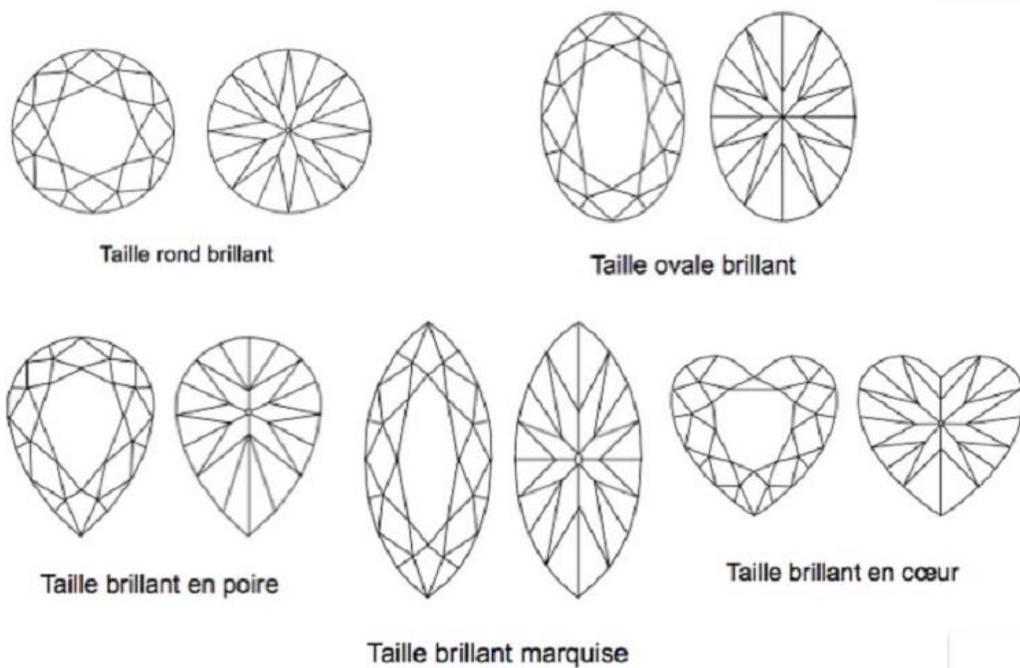
Gemme	Dureté	Clivage	Ténacité	Stabilité
Béryl	7,5	Difficile, très pauvre, basal	Bonne, sauf l'émeraude – fragile	Bonne, sauf l'émeraude – éviter les solvants
Chrysobéryl	8.5	Difficile, pauvre à modéré, prismatique	Excellente à bonne	Très bonne
Corindon	9	Aucun, mais peut présenter un parting	Excellente	Très bonne
Diamant	10	Difficile, parfait, octaédrique	Bonne	Excellente
Feldspath	6	Facile à modérer dans deux directions, parfait dans une autre	Pauvre	Bonne
Grenat	6,5 à 7,25	Aucun	Bonne, sauf démantôïde	Bonne
Jadéite	7	Polycristallin	Excellente	Bonne mais éviter l'acide à chaud
Néphrite	6,5	Polycristallin	Excellente	Bonne mais éviter l'acide à chaud
Opale	6	Aucun	Faible à passable	Passable à faible, éviter les acides
Perle	3,5 à 4	Aucun	Passable	Pauvre, éviter l'acide, les parfums, les fixatifs à cheveux et l'eau de piscine
Péridot	6,5	Pauvre	Passable à bonne	Passable, éviter l'acide et les vaporisant fixatifs à cheveux
Quartz	6 à 7	Très pauvre	Bonne à excellente	Bonne
Spinelle	8	Aucun	Bonne à excellente	Très bonne
Tanzanite	6,5	Moyennement facile, parfait dans une direction	Passable à pauvre	Bonne
Topaze	8	Moyennement facile, parfait dans une direction	Passable	Bonne
Tourmaline	7 à 7,5	Difficile, très bon, basal	Bonne	Très bonne
Turquoise	5,5 à 6	Aucun	Pauvre à passable	Pauvre, éviter l'acide, les parfums, les fixatifs à cheveux et l'eau de piscine
Zircon	6,5 à 7,5	Aucun	Faible, fragile	Bonne



*Les différentes forme de taille d'une gemme*



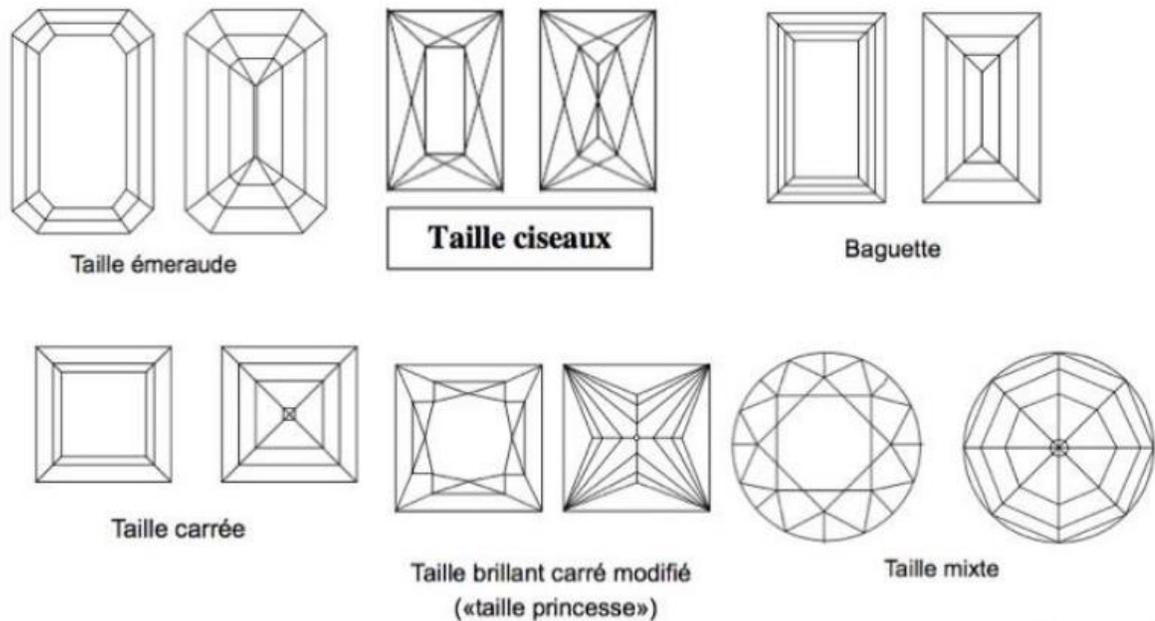
*Cabochons [8]*



*Tailles brillants [8]*

Le **brillant rond** est la forme incontournable du diamant. Dans les pierres de couleur, cette forme n'est généralement utilisée que pour des pierres de petites dimensions, appelées pierres de pavage. La **taille ovale** est de loin la forme la plus courante pour la pierre de couleur. Elle est également courante dans le diamant. La **taille poire** est idéale pour réaliser des colliers ou des pendentifs. La **taille cœur** est l'une des moins utilisées. Ces formes sont généralement

destinées à être montées en collier ou en pendentif. Aussi appelée navette, la *taille marquise* est assez peu utilisée. En effet, cette taille est très fragile, même si elle est utilisée pour de diamants ou des rubis. [15]



#### *Autres tailles facettées* [8]

La *taille coussin* est très recherchée dans les pierres de couleur. Bien que très utilisée dans le diamant, les coussins en diamant sont souvent mal taillés. La *taille émeraude* est le nom donné par les diamantaires à cette forme, mais les négociants en pierres de couleur utilisent souvent l'appellation RPC pour rectangle à pans coupés. La *taille asscher* est le nom donné à la taille émeraude carrée, mais uniquement pour le diamant. Dans les pierres de couleur, elle est appelée CPC pour carré à pans coupés. La *taille princesse* est une sorte de taille carrée brillantée. Elle n'est généralement utilisée que pour les diamants ou les pierres fines peu onéreuses. La *taille radiant* est une taille carrée brillantée à pans coupés. Tout comme la princesse, cette taille est très peu utilisée pour les saphirs, rubis, et émeraude. La *taille baguette* n'est généralement utilisée que pour épauler une pierre centrale plus importante, ou réaliser des bandes de diamants calibrés. [15]

## ANNEXE 5 : PHENOMENES OPTIQUES

Ils sont causés par la réflexion de la lumière sous des éléments situés sous la surface de la gemme.

- ***Adularescence***

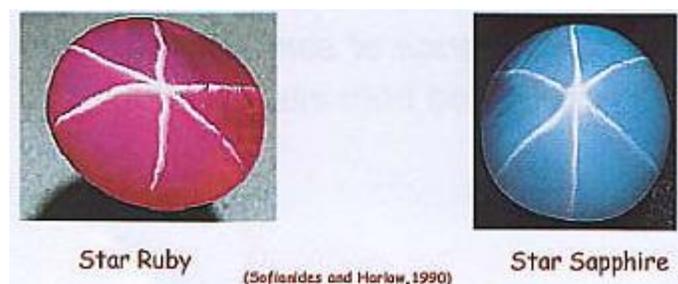
Certaines pierres comme par exemple la pierre de lune présente en surface un reflet gris bleuté, qui glisse sur la gemme en suivant la lumière. L'adularescence est due à la structure lamellaire des gemmes qui interfère avec la lumière.



*Adularescence dans la pierre de lune*

- ***Astérisme***

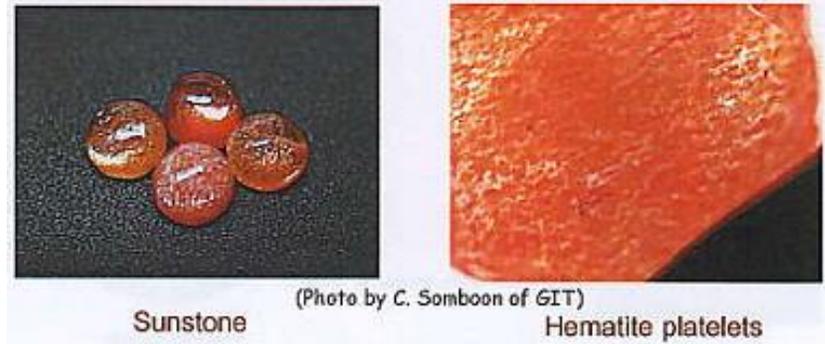
Comme son nom l'indique, l'astérisme fait apparaître, sous lumière artificielle, une étoile à la surface d'une gemme. Cette étoile, qui peut avoir de quatre à douze branches selon les pierres, provient d'inclusions en forme d'aiguilles agencées parallèlement dans diverses directions. De nombreuses pierres fines et précieuses peuvent être étoilées. Parmi elles, le saphir et le rubis sont les plus connus.



*Astérisme dans le rubis et saphir*

- ***Aventurescence***

Cet effet d'optique est dû à des paillettes incluses dans certaines pierres ornementales telles que l'aventurine ou la pierre de soleil (sunstone). Ces paillettes font scintiller la pierre lorsqu'elles réfléchissent la lumière.



*Aventurescence dans l'aventurine*

- ***Chatoyance***

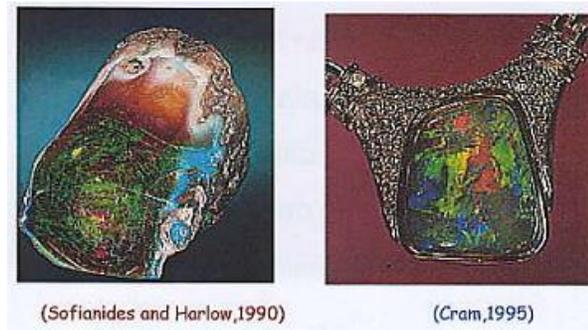
La chatoyance, aussi appelée « œil de chat », crée à la surface des gemmes un reflet lumineux qui n'est pas sans rappeler la pupille d'un félin. Comme l'astérisme, elle est provoquée par des inclusions en formes d'aiguilles, qui sont dans ce cas disposées de façon parfaitement parallèle dans la pierre. De nombreuses gemmes peuvent présenter une chatoyance, le saphir ou le rubis par exemple. Mais la plus recherchée est le chrysobéryl dit cymophane.



*Chatoyance dans le chrysobéryl et aquamarine*

- ***Iridescence***

Il s'agit du jeu de couleurs typique des opales nobles. Les minuscules sphères de silice disposées en couches dans l'opale créent des éclats colorés dans tout le spectre lumineux. Ils semblent alors se modifier dépendant de l'angle sous lequel on observe la pierre.



*Iridescence dans l'opale*

- ***Irisation***

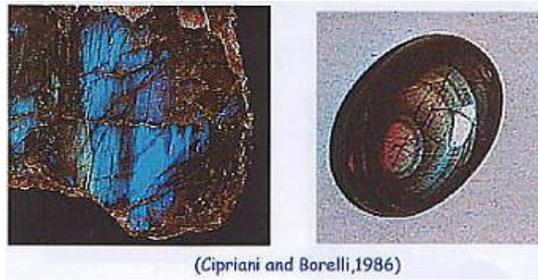
Lorsque la lumière vient frapper les éventuelles fissures microscopiques d'une pierre, elle est alors dispersée et laisse apparaître son spectre lumineux. Ce phénomène est particulièrement présent dans le quartz et le diamant.



*Quartz mystique* <sup>[25]</sup>

- ***Labradorescence***

La labradorescence est un effet d'optique que l'on ne rencontre que dans la pierre du même nom, la labradorite. Il s'agit d'un jeu de vifs reflets métalliques, le plus souvent verts ou bleus, qui s'étalent sur de larges zones.



(Cipriani and Borelli, 1986)

### *Labradorescence dans la labradorite*

- *Opalescence*

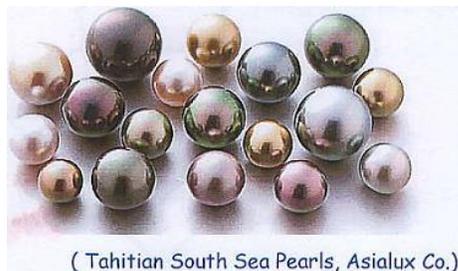
On rencontre cet effet dans les opales communes où la lumière est diffusée à l'intérieur de la gemme, créant ainsi un reflet bleu laiteux.



*Opale* <sup>[26]</sup>

- *Orient*

Le mot Orient désigne l'éclat irisé et coloré des perles. Aussi appelé lustre, il est dû à la réfraction de la lumière sur les couches concentriques de nacre. Il est le principal critère de qualité d'une perle.



( Tahitian South Sea Pearls, Asialux Co.)

### *Perles*

- *Soies*

L' éclat soyeux de certains saphirs ou rubis provient de nids de fines aiguilles de rutile à l'intérieur de la gemme qui reflètent la lumière. Cet effet est hautement apprécié. Néanmoins, lorsque ces aiguilles sont trop présentes, elles peuvent altérer l'éclat de la pierre, diminuant ainsi sa valeur.



*Longue aiguille de rutile à l'intérieur d'un saphir*

- *Changement de couleur*

Certaines gemmes très rares présentent une couleur différente si elles sont exposées à une lumière naturelle ou artificielle. La plus connue d'entre elles est l'alexandrite, une variété spécifique de chrysobéryl, dont la couleur verte sous lumière naturelle, vire au rose sous lumière artificielle.



*Effet changement de couleur chez l'alexandrite*

## ANNEXE 6: LUMINESCENCE

*Tableau des couleurs de fluorescence de quelques gemmes aux UV <sup>[13]</sup>*

Minéral	UVL	UVC
Apatite jaune	Lilas	Lilas/rose
Apatite bleue	Bleu foncé	Bleu pâle
Apatite verte	Jaune moutarde	Jaune moutarde pâle
Apatite violette	Jaune verdâtre	Mauve pâle
Bénitoïte	Inerte ou rouge terne	Bleu brillant
Danburite	Bleu ciel	
Fluorite	Bleu/violet brillant	
Kunzite	Orange ou doré	
Saphir blanc	Orange	Inerte
Saphir blanc synthétique	Inerte	Bleu foncé
Saphir jaune du Sri Lanka	Abricot	
Saphir jaune d'Australie et de Thaïlande	Inerte (fer)	
Saphir jaune synthétique	Inerte	
Saphir orange synthétique	Rouge	
Saphir bleu	Inerte (fer)	
Saphir bleu synthétique	Bleu-vert	
Scapolite	Jaune	Rose
Spinelles rouge et rose, naturel et synthétique	Rouge	Rouge
Spinelles vert et jaune synthétique	Vert	
Spinelles bleu synthétique	Rouge	
Spinelles bleu naturel	Inerte	
Spinelles blanc synthétique	Inerte	Bleu/blanc

## ANNEXE 7 : INCLUSIONS

*Tableau de quelques terminologies typiques d'inclusions [8]*

<b>Termes usuelles</b>	<b>Explication/exemple</b>
Atoll, halo ou œuf sur plat	Minéral inclus entouré d'une fissure de tension ou restes d'un liquide autour d'une cavité ou d'un cristal, comme dans le corindon
Bamboo	Cristal d'actinote, comme dans l'émeraude
Mille pattes	Clivages qui se croisent dans la pierre de lune
Empreinte digitale (terme très fréquent)	Givre de guérison, ou groupe de petites particules piégées lors du processus de formation naturel ou synthétique
Queue de cheval ou poney	Inclusions fibreuses issues d'un noyau central dans le grenat démantôide
Nénuphar ou feuille de nénuphar	Fissure de tension partiellement cristallisée autour d'un cristal ou d'une cavité dans le péridot
Aiguille	Inclusion cristalline en forme d'aiguille (inclusion aciculaire)
Pluie	Minces tubes rectilignes parallèles les uns aux autres dans le béryl
Soie (terme fréquent)	Fines inclusions de rutile qui peuvent donner une apparence nébuleuse de la pierre, notamment dans les corindons
Flocon de neige	Cristallines blanchâtres sur un fond foncé, notamment dans l'obsidienne
« Snow stars »	Gouttelettes de liquide entourant une inclusion cristalline, dans les béryls par exemple
Peau de zèbre ou peau de tigre	Bandes de givre de guérison le long des plans de macle dans le quartz
Inclusions capillaires	Fines inclusions liquides qui se rejoignent comme une toile d'araignée, peuvent montrer deux phases ; observées dans la tourmaline

## ANNEXE 8 : LES INSTRUMENTS GEMMOLOGIQUES

Les instruments que le gemmologue utilise permettent l'identification de nombreuses gemmes. Ils permettent dans certains cas de dire si la gemme est synthétique ou naturelle, ou encore de donner une appréciation de sa qualité, et parfois de sa valeur. Lorsque le résultat de son analyse laisse un doute, le gemmologue s'adresse à un laboratoire où des spécialistes, à l'aide d'appareils scientifiques, effectueront une analyse détaillée de la gemme, de sa composition chimique, minéralogique et cristallographique.

### Réfractomètre

Le réfractomètre est un appareil qui mesure l'indice de réfraction des gemmes. Il est basé sur le principe de la réflexion totale interne que l'on provoque par la mise en contact entre une partie de l'appareil à très fort indice et la gemme que l'on teste. Le contact optique entre les deux parties est assuré par un liquide d'indice élevé (1,81). La réflexion totale interne ne se produit que dans la partie d'indice élevé. Si la gemme testée a un indice :

- plus élevé que l'hémicylindre, la réflexion totale interne aura lieu dans celle-ci et aucun indice ne pourra se lire sur le réfractomètre ;
- plus faible que celui de l'hémicylindre, la réflexion totale interne se produira dans le réfractomètre. On pourra lire son IR.

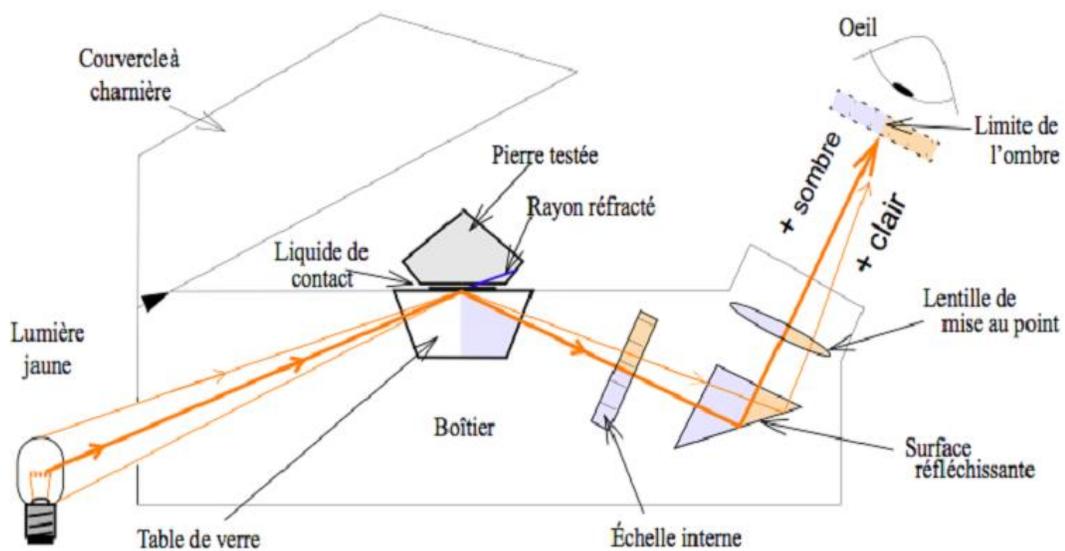


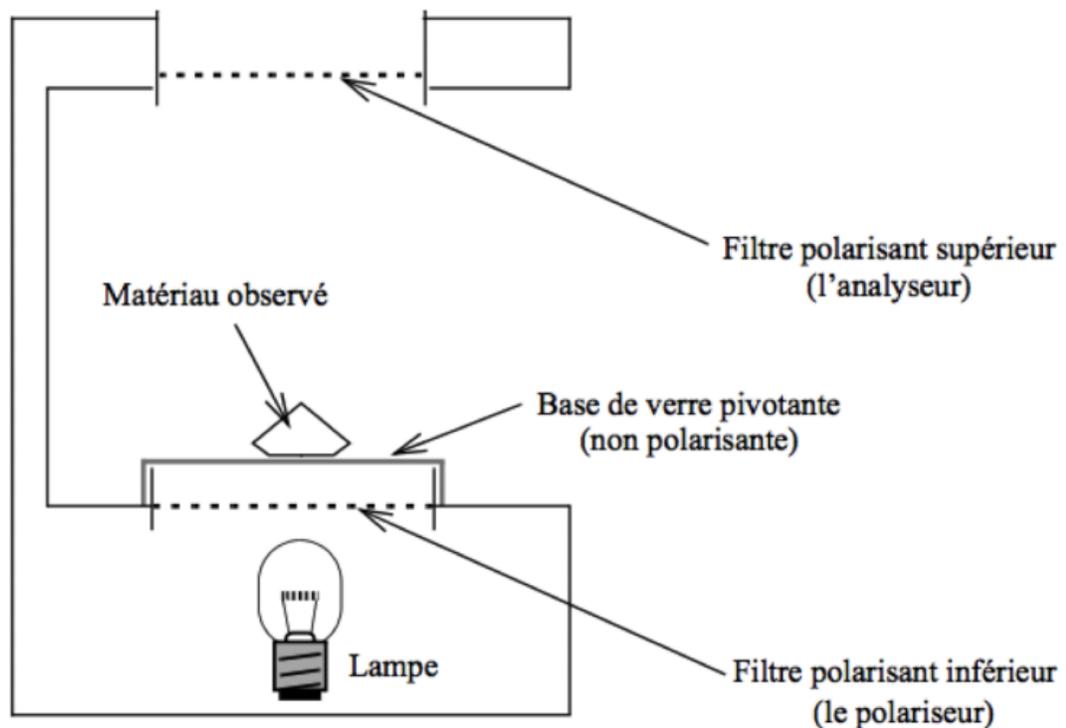
Tableau de quelques résultats d'un test au réfractomètre<sup>[9]</sup>

<i>Tablette d'identification (pour 12 espèces minérales)</i>					
<i>indice de réfraction</i>	<i>erreur</i>	<i>Espèce minérale</i>	<i>biréfringence</i>	<i>caractère optique système cristallin</i>	<i>densité</i>
2.417		DIAMANT		isotrope, cubique	3.9
1.925 - 1.984	+04 -0.145	ZIRCON	0.00-0.059	uniaxe +, quadratique	
		GRENATS :			
1.89	+01 -0.03	andradite var. dématoïde		isotrope, cubique	3.83
1.81	+004 -0.020	spessartite		isotrope, cubique	4.15
1.79	± .03	almandin		isotrope, cubique	4.05
1.76	+010 -0.020	rhodolite		isotrope, cubique	3.84
1.746	+010 -0.26	pyrope		isotrope, cubique	3.78
1.74	+020 -0.10	grossulaire		isotrope, cubique	3.61
1.762 - 1.770	+009 -0.005	CORINDON	0.008 - 0.010	uniaxe, rhomboédrique	4.0
1.762 - 1.770	+005 -0.002	CORINDON synthétique	0.008	uniaxe, rhomboédrique	4.0
1.746 - 1.755	+004 -0.006	CHRYSOBERYL	0.008 - 0.010	biaxe +, orthorhombique	3.73
1.718	+01 -0.03	SPINELLE		isotrope, cubique	2.6
1.728	+017 -0.008	SPINELLE, synthétique		isotrope, cubique	3.64
1.660 – 1.676	± .005	SPODUMENE	0.014 - 0.016	biaxe +, monoclinique	3.18
1.654 - 1.690	± .020	PERIDOT	0.035 - 0.038	biaxe+/-, orthorhombique	3.34
1.624 - 1.644	+011 -0.009	TOURMALINE	0.018 - 0.040	uniaxe -, rhomboédrique	3.06
1.577 - 1.583	± .017	BERYL	0.005 - 0.009	uniaxe -, hexagonal	2.72
1.561 - 1.564	± .01	Emeraude synthétique	0.003 - 0.008	uniaxe -, hexagonal	2.68
1.544 - 1.553	± .005	QUARTZ	0.009	uniaxe +, rhomboédrique	2.65
1.535 - 1.539		QUARTZ calcédoine	0.000 - 0.004		2.6
1.45	+020 -0.080	OPALE		isotrope, amorphe	2.15

## Polariscope

Le polariscope est un appareil qui détermine le caractère isotrope ou anisotrope d'une pierre. Une lecture d'indices au réfractomètre donne ce renseignement mais parfois, il est difficile d'observer des biréfringences extrêmement faibles ; on voit une ligne qui semble se déplacer sans pouvoir apprécier, c'est-à-dire chiffrer, ce déplacement. Une lecture au point ne peut renseigner sur l'anisotropie d'une gemme. Et enfin, des gemmes anisotropes ont un deuxième indice qui est en dehors de la limite de lecture. Pour toutes ces raisons, il est conseillé d'utiliser en premier lieu le polariscope puis le réfractomètre. Cependant, le polariscope ne peut pas être utilisé pour les pierres opaques.

Outre, cet appareil permet aussi de connaître le caractère optique d'une pierre (uniaxe ou biaxe). Il met en évidence les zones de tensions internes. Il donne une information sur les textures de certaines gemmes : type agrégat donc gemmes microcristallines. Et enfin, il montre des effets caractéristiques signant un verre ou un spinelle synthétique Verneuil.

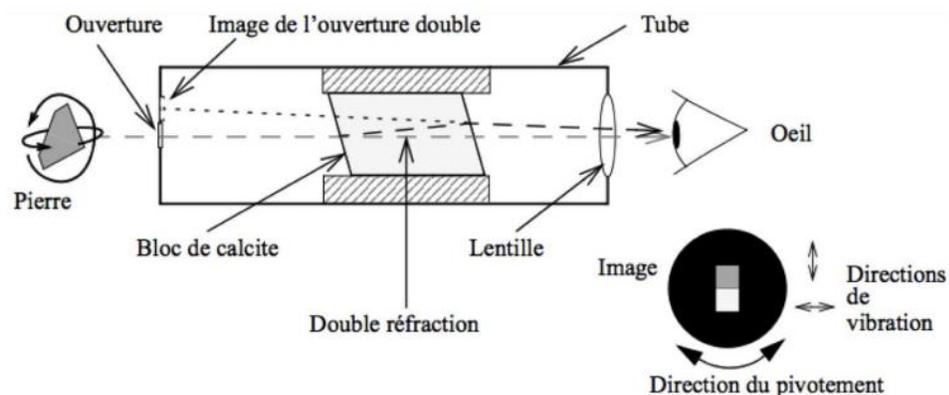


## Dichroscope

Le dichroscope est un appareil qui sert à observer les couleurs ou nuances de couleurs des pierres anisotropes transparentes colorées, serties ou non, brutes ou taillées. Si le résultat obtenu évoque :

- la présence de deux couleurs, alors la pierre est uniaxe ou biaxe ;
- la présence de trois couleurs, alors la pierre est biaxe ;
- l'absence de différence de couleurs, alors la pierre est isotrope ou l'observation se fait selon un axe optique.

Cet instrument est souvent utilisé lorsque les résultats obtenus au polariscope sont douteux. Réciproquement, lorsque les nuances entre deux couleurs sont trop faibles, donc difficilement appréciables, le polariscope montrera clairement l'anisotropie ou l'isotropie de la gemme testée. Outre, il ne faut pas confondre des zones différemment colorées d'une pierre avec des couleurs de pléochroïsme. Dans ce cas, il est nécessaire de traiter chaque zone séparément.



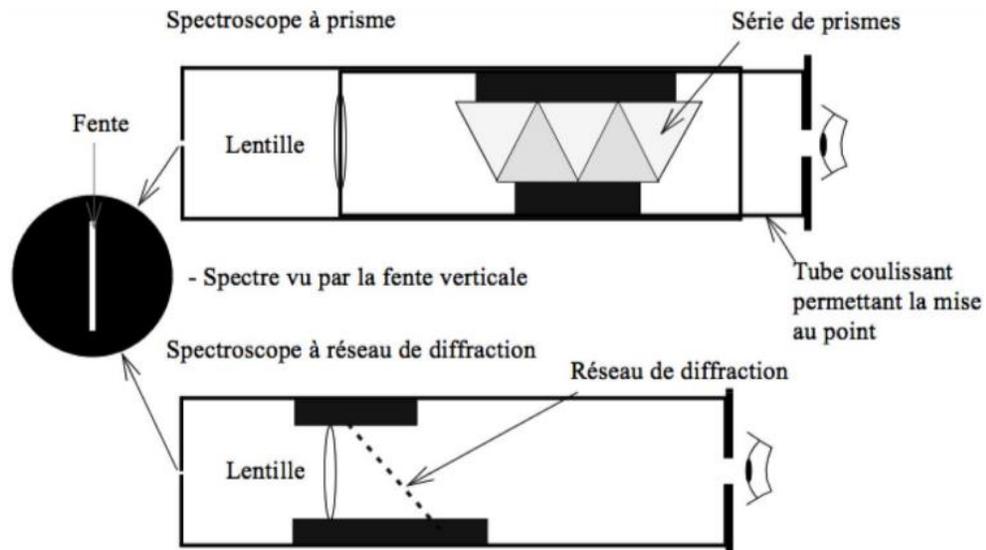
*Structure du dichroscope à calcite*

## Spectroscope

Le spectroscope est un objet cylindrique. L'une des extrémités comprend une fente au travers de laquelle la lumière passe, l'autre extrémité se trouve en oculaire et entre les deux extrémités se

loger l'organe vital du spectroscope. C'est le système qui produit le spectre de la lumière blanche. Il existe deux moyens de le produire :

- soit un système de prismes qui vont « disperser » la lumière. Fente d'entrée ajustable. On obtient un spectre unique et très lumineux. Par contre, l'échelle de lecture est particulièrement dilatée dans la région du bleu/violet
- soit un réseau de diffraction. Un réseau est une petite plaquette de matière transparente que l'on grave de fines rayures, de l'ordre de 600 rayures par mm. La lumière incidente va « diffracter » sur ces rayures. Plusieurs spectres sont générés, le spectre principal est moins lumineux qu'avec le système à prisme, mais l'échelle de lecture est linéaire.



### Filtre Chelsea

On utilise des filtres conçus pour ne laisser passer qu'une frange de longueurs d'onde. Le filtre Chelsea transmet uniquement le rouge profond et le vert-jaune.

Il a été créé initialement pour distinguer les émeraudes colorées par le chrome des autres pierres vertes utilisées comme imitation de cette gemme très prisée. On se sert de ce filtre aussi pour distinguer l'élément cobalt qui colore les pierres en bleu. Ces matériaux colorés au cobalt

transmettent les longueurs d'ondes dans le rouge. On peut ainsi distinguer les matériaux artificiels de la plupart des saphirs, aigues-marines et zircons bleus qui apparaissent en général vert ou vert nuancé de gris. En outre, cet instrument s'avère utile pour rapidement séparer des pierres d'un lot et trier les indésirables. Pourtant, c'est un test que l'on ne considère pas comme diagnostique.



### Loupe 10X

L'instrument devrait être le plus utilisé pour aider à l'observation et l'identification des gemmes.

Avec un grossissement 10 fois, on peut :

- voir plusieurs caractéristiques d'identification ;
- éviter les mouvements de tremblement ;
- obtenir un raisonnable champ de vision ;
- mettre en focus l'intérieur de la pierre.

Le grossissement 10X est un grossissement standard utilisé pour garder la pureté du diamant.



## Microscope

Le microscope est d'une importance primordiale dans les investigations gemmologiques. Aucune autre méthode ne peut se substituer à une observation minutieuse. Il permet l'observation des caractéristiques externes et internes des gemmes naturelles, synthétiques ou d'imitations. Les microscopes utilisés en gemmologie ont été conçus pour observer sous grossissement bien évidemment. Grossir une image serait vain si cela n'était associé à l'emploi d'éclairages variés. Ils en sont les organes vitaux.

Il existe deux types de microscopes gemmologiques :

- le premier, développé par le professeur K Schlossmacher, a un axe d'observation horizontal. Il permet l'observation aisée des pierres en immersion grâce à des pinces qui tournent autour d'un axe vertical ;
- l'autre, tout aussi pratique, est le microscope binoculaire stéréoscopique associé à un éclairage dit à champ noir, créé par R.M. Shipley Jr. L'objectif est ici vertical dans l'axe de l'éclairage, l'axe de rotation des pierres observées étant horizontal. Cependant, tourner les pierres en immersion est moins aisé.

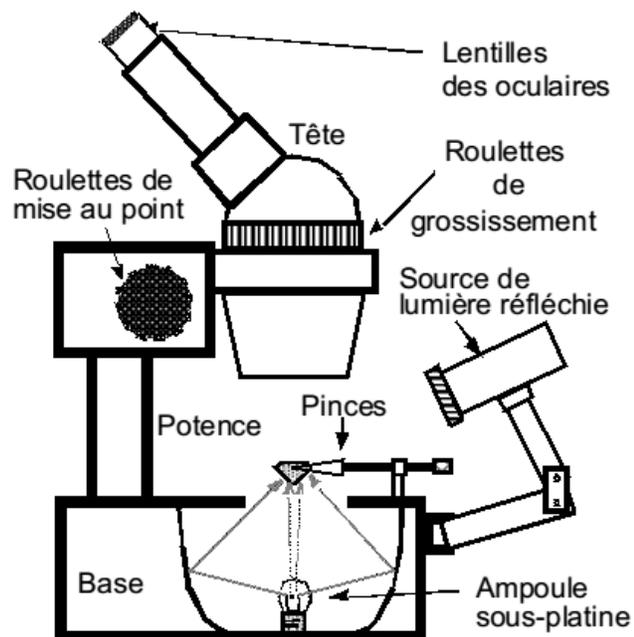


Figure : Les différentes parties d'un microscope

## ANNEXE 9 : TERRES RARES

*Tableau comparatif de la concentration en ETR, en métaux industriels et précieux de la croûte terrestre (ppm)*

Numéro atomique	Nom	Symbole	Abondance dans la croûte terrestre (ppm)	Groupe
58	Cérium	Ce	62	Élément de terres rares
60	Néodyme	Nd	33	Élément de terres rares
57	Lanthane	La	32	Élément de terres rares
39	Yttrium	Y	29	Élément de terres rares
21	Scandium	Sc	22	Élément de terres rares
59	Praséodyme	Pr	9	Élément de terres rares
62	Samarium	Sm	7	Élément de terres rares
64	Gadolinium	Gd	6	Élément de terres rares
66	Dysprosium	Dy	6	Élément de terres rares
68	Erbium	Er	3,03	Élément de terres rares
70	Ytterbium	Yb	2,93	Élément de terres rares
63	Europium	Eu	1,80	Élément de terres rares
67	Holmium	Ho	1,17	Élément de terres rares
65	Terbium	Tb	0,94	Élément de terres rares
69	Thulium	Tm	0,47	Élément de terres rares
71	Lutécium	Lu	0,46	Élément de terres rares
61	Prométhium	Pm	n/a (infinitesimal)	Élément de terres rares
13	Aluminium	Al	79 000	Métaux industriels
26	Fer	Fe	55 350	Métaux industriels
12	Magnésium	Mg	26 000	Métaux industriels
22	Titane	Ti	6 302	Métaux industriels
25	Manganèse	Mn	1 156	Métaux industriels
24	Chrome	Cr	131	Métaux industriels
28	Nickel	Ni	90	Métaux industriels
30	Zinc	Zn	76	Métaux industriels
29	Cuivre	Cu	59	Métaux industriels
82	Plomb	Pb	13	Métaux industriels
50	Étain	Sn	2,27	Métaux industriels
74	Tungstène	W	1,29	Métaux industriels
42	Molybdène	Mo	1,27	Métaux industriels
47	Argent	Ag	0,0750	Métaux précieux
46	Palladium	Pd	0,0082	Métaux précieux
78	Platine	Pt	0,0036	Métaux précieux
79	Or	Au	0,0032	Métaux précieux
76	Osmium	Os	0,0018	Métaux précieux
44	Ruthénium	Ru	0,0010	Métaux précieux
45	Rhodium	Rh	0,0010	Métaux précieux
77	Iridium	Ir	0,0008	Métaux précieux

Source : Secrétariat de la CNUCED

Tableau récapitulatif des terres rares				
Élément	Principaux usages (monde)	Consommation mondiale	Principaux producteurs (monde)	Commentaires
Scandium	Piles à combustible, alliages d'aluminium	10 à 15 t/an (USGS)	Chine, Kazakhstan, Russie, Ukraine Pas de données fiables sur la production, car c'est un sous-produit de nombreuses autres exploitations minières (uranium, titane, etc.).	Risque de pénurie quasiment inexistant du fait de l'abondance des ressources (il n'est pas présent dans la liste européenne).
Yttrium	Phosphores (79%) Céramiques (21 %)	7 500 t/an	Chine (99.9 %)	La quasi-totalité de la production est en Chine, mais les réserves non exploitées sont estimées à plus de 500 000 tonnes.
Lanthane	Craquage catalytique (26 %) Batteries NiMH (nickel métal hydrure) (26 %)	31 500 t/an	Chine (87 %) États-Unis (8 %)	
Cérium	Polissage (36 %) Métallurgie (19 %)	45 500 t/an	Chine (84 %) États-Unis (8 %)	
Praséodyme	Aimants (73 %)	4 900 t/an	Chine (90 %) États-Unis (6 %)	
Néodyme	Aimants (89 %)	20 000 t/an	Chine (91 %) États-Unis (4 %)	
Samarium	Aimants (97 %)	500 t/an	Chine (93 %)	La production est très supérieure à la demande, donc aucune tension n'est prévisible malgré une utilisation en forte hausse.

Tableau récapitulatif des terres rares				
Élément	Principaux usages (monde)	Consommation mondiale	Principaux producteurs (monde)	Commentaires
Europium	Phosphores (96 %)	425 t/an	Chine (93 %) Australie (4 %)	
Gadolinium	Aimants (35 %) Métallurgie (28 %) Phosphores (23 %)	1 000 t/an	Chine (97 %)	La demande pourrait exploser selon les progrès de la réfrigération magnétique.
Terbium	Phosphores (71 %) Aimants (24 %)	290 t/an	Chine (98 %)	
Dysprosium	Aimants (98 %)	845 t/an	Chine (99 %)	Très cher, c'est le facteur principal du coût de fabrication des aimants permanents qui l'utilisent. La recherche a permis de diminuer son utilisation mais pas de le substituer à performances équivalentes.
Erbium	Verres (72 %) Phosphores (25 %)	540 t/an	Chine (99 %)	
Holmium + Thulium + Ytterbium + lutécium	Trop petit marché, pas de données précises	75 t/an	Chine (98 %)	La production est très supérieure à la demande et la plupart des usages permettent la substitution.

## **TABLE DES MATIERES**

TENY FISAORANA

GLOSSAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES ACRONYMES

LISTE DES ANNEXES

SOMMAIRE

INTRODUCTION ..... 1

### **PARTIE I : GENERALITES SUR LA MINERALOGIE, GEMMOLOGIE ET LES TERRES**

RARES ..... 3

Chapitre I. La Minéralogie..... 3

I.1. Structure cristalline ..... 3

I.1.1. Réseaux de Bravais ..... 4

I.1.2. Axe de rotation ..... 4

I.1.3. Particularités cristallines ..... 5

I.1.4. Système cristallin ..... 6

I.2. Propriétés d'identification des minéraux ..... 7

I.2.1. Habitus ou forme ..... 7

I.2.2. Couleur ..... 7

I.2.3. Clivage..... 8

I.2.4. Cassure ..... 8

I.2.5. Dureté de Mohs ..... 8

I.2.6. Trait ou trace ..... 8

I.2.7. Eclat..... 9

I.2.8. Macle ..... 9

I.2.9. Transparence ..... 10

I.2.10. Densité.....	10
I.2.11. Composition chimique .....	11
I.3. Classification des minéraux .....	11
Chapitre II. La Gemmologie .....	13
II.1. Critères définissant une gemme.....	14
II.1.1. Beauté.....	14
II.1.2. Rareté .....	14
II.1.3. Durabilité .....	14
II.1.4. Attrait commercial .....	14
II.2. Différents types de gemmes .....	15
II.3. Les propriétés des minéraux gemmes.....	15
II.3.1. La couleur des gemmes.....	16
II.3.2. Indice de réfraction .....	16
II.3.3. Propriétés optiques .....	17
II.3.4. Pléochroïsme .....	18
II.3.5. Phénomènes optiques et éclat .....	20
II.3.6. Dispersion et feu .....	21
II.3.7. Luminescence.....	22
II.3.8. Inclusions .....	23
II.3.9. Autres propriétés d'une gemme .....	24
II.3.10. Formes de la taille .....	24
II.4. Traitement.....	25
II.5. Instruments .....	29
Chapitre III. Les terres rares.....	29
III.1. Classification des éléments de terres rares .....	30
III.2. Propriétés.....	31
III.3. Utilisations .....	32
III.4. Mécanisme de concentration et types de gisements.....	35
III.5. Séparation.....	38

PARTIE II : CONCEPTION DU PROGICIEL DE MINERALOGIE, GEMMOLOGIE ET DE TERRES RARES.....	40
Chapitre IV. Présentation du thème .....	40
IV.1. Raison du choix du thème.....	40
IV.2. Résultats attendus.....	41
IV.3. Pré - analyse .....	41
IV.4. Méthodologie d'approche .....	42
Chapitre V. conception du système d'information .....	42
V.1. Quelques définitions.....	42
V.2. Aperçu sur les SGBD .....	43
V.3. La méthode MERISE .....	51
V.4. Modélisation du projet.....	56
Chapitre VI. Réalisation et mise en œuvre du projet.....	63
VI.1. Raison du choix de WinDev .....	63
VI.2. Présentation du progiciel.....	64
VI.2.1. Tables .....	64
VI.2.2. Requêtes .....	65
VI.2.3. Formulaires.....	65
VI.2.4. Etats .....	72
VI.3. Mise en œuvre du progiciel .....	75
VI.1. Rapport .....	75
VI.2. Suggestion .....	76
CONCLUSION.....	77
BIBLIOGRAPHIE	
WEBOGRAPHIE	
ANNEXES	
TABLE DES MATIERES	