GISEMENTS DIAMANTIFÈRES

Le diamant est une pierre précieuse connue par sa grande dureté, ses propriétés optiques (haut taux de réfraction et fort pouvoir réflecteur) et sa propriété électrique (bon isolant électrique).

Sa valeur ne dépend pas de sa quantité, mais bien de sa qualité : carat (= 0.2g), clarté, couleur et coupe (forme) (Jébrak & Marcoux, 2008).

Le diamant est présent dans de nombreuses roches (basaltes alcalins, péridotites de type alpin, lamprophyres ultramafiques, roches métamorphiques…), mais seules les **kimberlites et lamproïtes** le renferment en quantité économique. Les dimensions des gîtes sont aux alentours de 0.6 km3 à 3 km3 pour les gîtes près de la surface de la Terre (Kjarsgaard, 1996). La teneur des diamants varie entre 0.5 et 5 carats/tonne (soit 0.1 à 1 ppm).

Les diamants ne cristallisent pas dans ces roches, il s'agit plutôt d'enclaves **« xénolites »** arrachées par les laves au cours de leur montée.

Les Kimberlites sont des roches ignées ultra-potassiques porphyriques avec Ol, Opx enstatite (Mg), Cpx diopside (Ca, Mg) chromifère, phlogopite, grenat pyrope (Mg)-almandite (Fe) dans une matrice finement **grenue** mafique. Elles renferment également des nodules de roches ultramafiques.

Elles s'associées aux points chauds sous un craton continental.

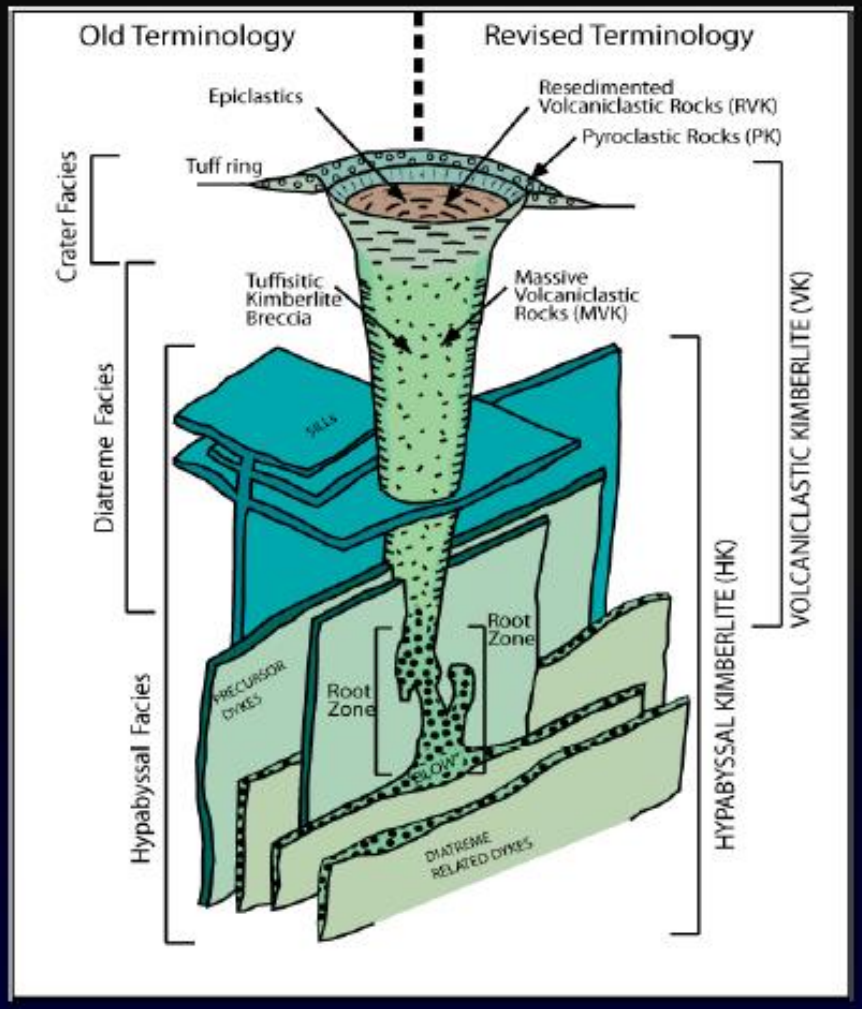
Les kimberlites sont divisées en kimberlites du groupe I et kimberlites du groupe II (Smith et al. 1985).

Le groupe I correspond aux roches archétypes de la région de Kimberley, en Afrique du Sud, dénommées **kimberlites basaltiques par Wagner (1914).**

Le groupe II est celui des kimberlites lamprophyriques ou micacées (connues sous le nom d'**orangéïtes).**

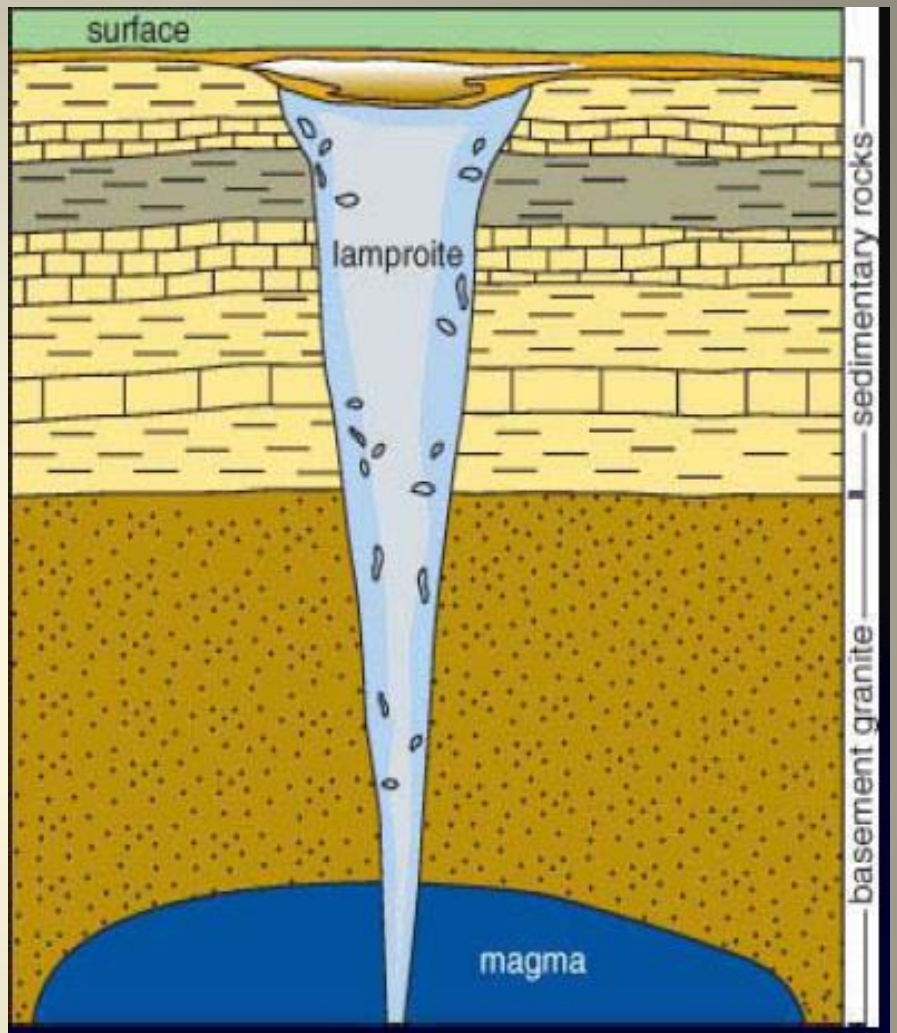
Les lamproïtes sont définies comme des roches effusives ultrapotassiques magnésiennes, porphyriques (**leucite, sanidine, phlogopite titanifère, amphibole titanifère, olivine)** dans une matrice finement grenue mafique**.**
Elles sont caractérisées par des rapports élevés en K2O/Na2O, généralement supérieur à 3.

La forme la plus courante des pipes (cheminées) kimberlitiques et lamproïtiques est la forme de cône, bien qu'elle puisse aussi se présenter sous la forme de dyke et filons-couches.
Une pipe kimberlitique est constituée schématiquement de trois zones



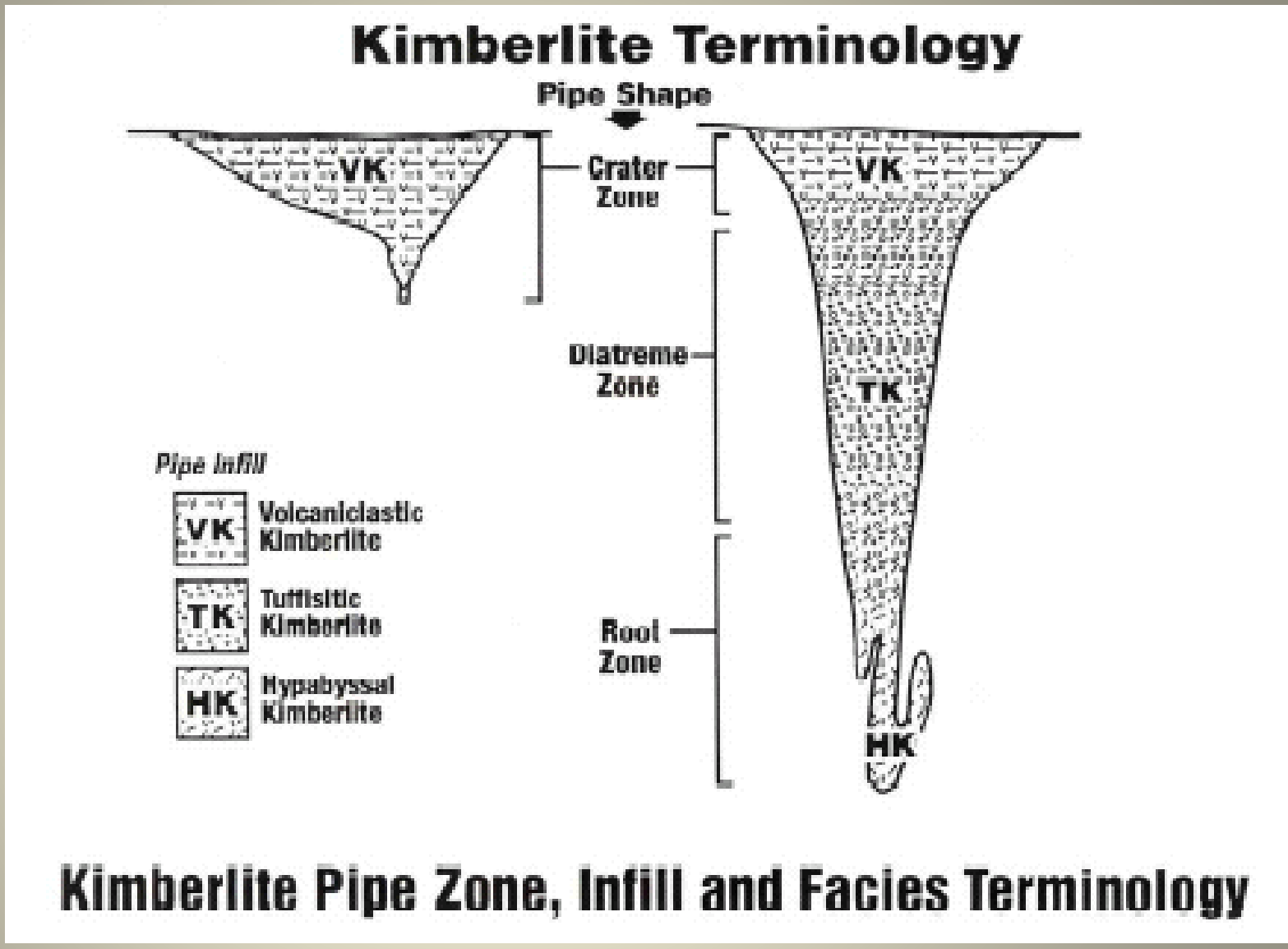
KIMBERLITE :

roche volcanique ultramafique (riche en magnésium), potassique et riche en éléments incompatibles, ainsi qu'en volatils (H2O et CO2), provenant du manteau



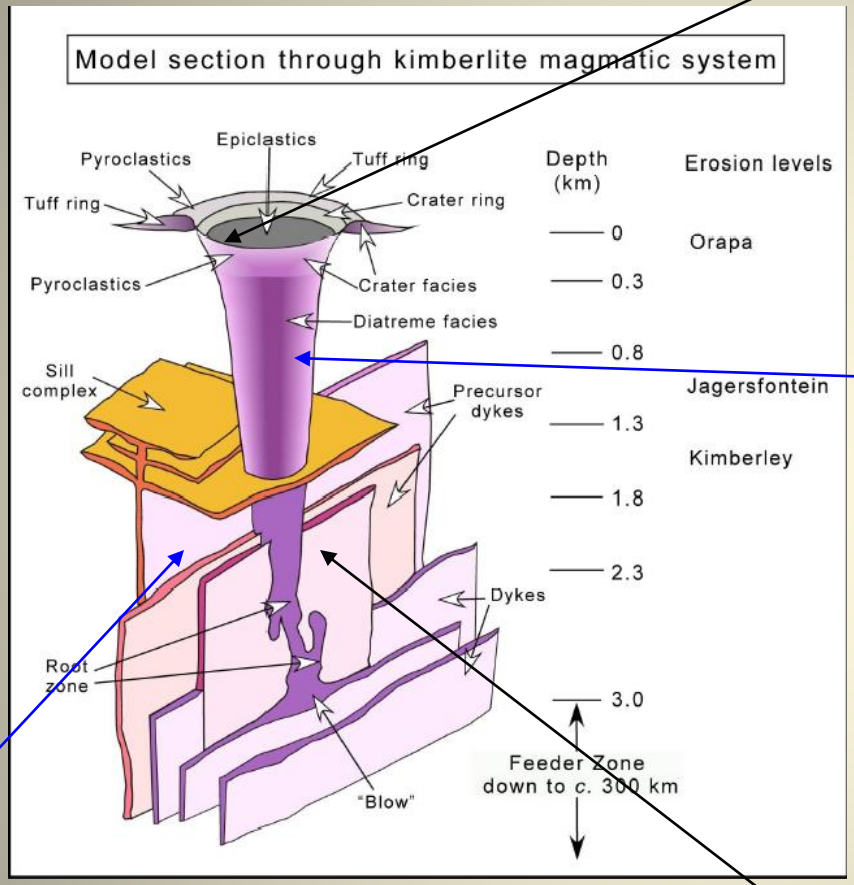
LAMPROITE :

Roche volcanique à subvolcanique ultra-potassique,
provenant du manteau



Une pipe kimberlitique est constituée schématiquement de trois zones

Une cheminée kimberlitique est constituée de plusieurs parties qui peuvent être diamantifères



***Cratère*: L'éruption kimberlitique projette roches et cendres à la surface, formant un anneau de tuf autour de l'ouverture du volcan.**

Le diatrème: **se forme lors d'une éruption explosive dans la partie inférieure de la zone de racines. Il constitue la partie la plus épaisse de la cheminée kimberlitique et repose sous le cratère. Il mesure plus d'un kilomètre de longueur, possède des parois abruptes et a la forme d'une carotte.**

Le dyke kimberlitique, qui est généralement tabulaire et étroit, est composé de kimberlite hypabyssale et proviendrait de la zone de racines.

La zone de racines: **se forme par la cristallisation du magma sous le diatrème.**

Différents types d'inclusions ont été découverts dans les diamants. Elles permettent de connaître leur environnement de formation, et nous renseignent également sur la minéralogie du manteau.

Type P

Les diamants dits 'péridotitiques' (type P) contiennent un cortège de minéraux en inclusion, caractéristiques d'un assemblage péridotitique : l'olivine , l'orthopyroxène (de type enstatite), le grenat, le clinopyroxène (de type diopside), la chromite et les sulfures. Les teneurs en chrome et en calcium des grenats permettent d'identifier la roche hôte plus précisément, les deux lithologies les plus fréquentes étant les lherzolites et les harzburgites

1- Les diamants de type P : (associés aux péridotites)

Les teneurs rapprochées en $\delta^{13}C$ avec une moyenne aux alentours de 5 ‰ = provenance du manteau supérieur juvénile

Le carbone proviendrait de l'oxydation partielle du méthane CH_4, ou d'autres hydrocarbures.

Leurs inclusions sont principalement des grenats riches en Cr, diopsides chromifères, forstérite et enstatite.

2. LES INCLUSIONS de péridotite dans ce diamant se reconnaissent à leurs olivines vert pâle *(flèche verte)* et aux oxydes noirs *(flèche noire)*.

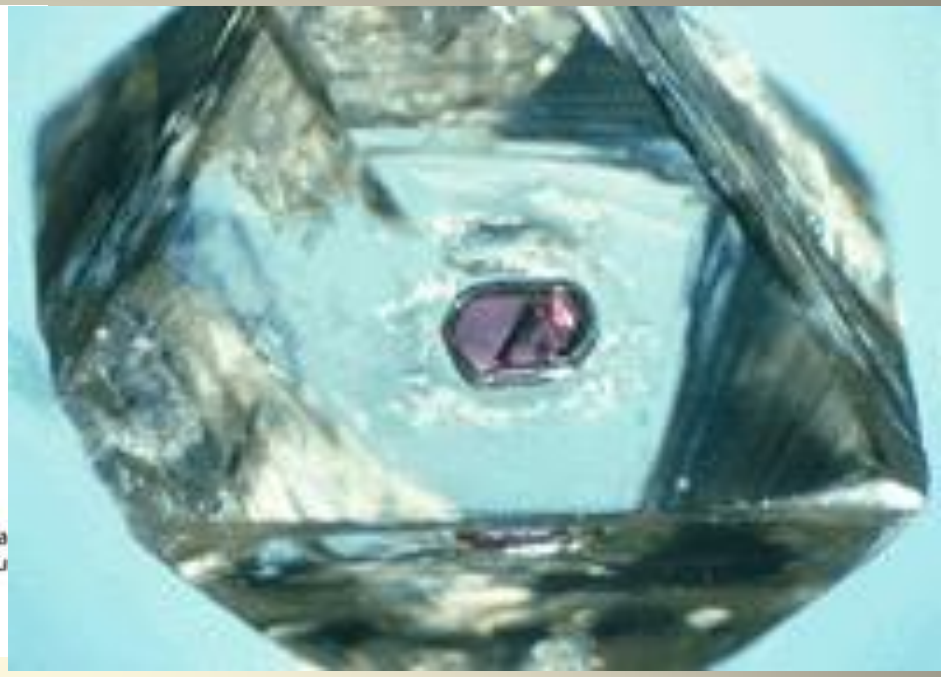


photo d'un diamant contenant un grenat de type pyrope (à gauche) et des olivines et oxydes (à droite) en inclusion (image extraite du site web de l'American Museum of Natural History).

2- Les diamants de type E : (associés aux Eclogites)

Les principaux minéraux présents en inclusion dans les diamants dits ‘éclogitiques’ (type E) sont le grenat, le clinopyroxène (de type omphacite), les sulfures et plus rarement la coésite, l’orthopyroxène, et le disthène.

En pratique, la distinction entre les paragenèses péridotitique et éclogitique se fait surtout grâce à la composition chimique des grenats : en effet, les grenats « péridotitiques » sont riches en Cr et pauvres en Ca, tandis que les grenats

« éclogitiques » sont pauvres en Cr et riches en Ca .

teneurs en $\delta^{13}C$ nettement plus dispersées entre 35 ‰ et 5 ‰

→ existence d'un nombre conséquent d'origines diverses.

Le carbone proviendrait de matériaux subductés dont les compositions dépendraient par conséquent des zones géographiques : de magmas basaltiques de haute pression ou bien d'anciennes roches basaltiques de croutes océaniques subductées.

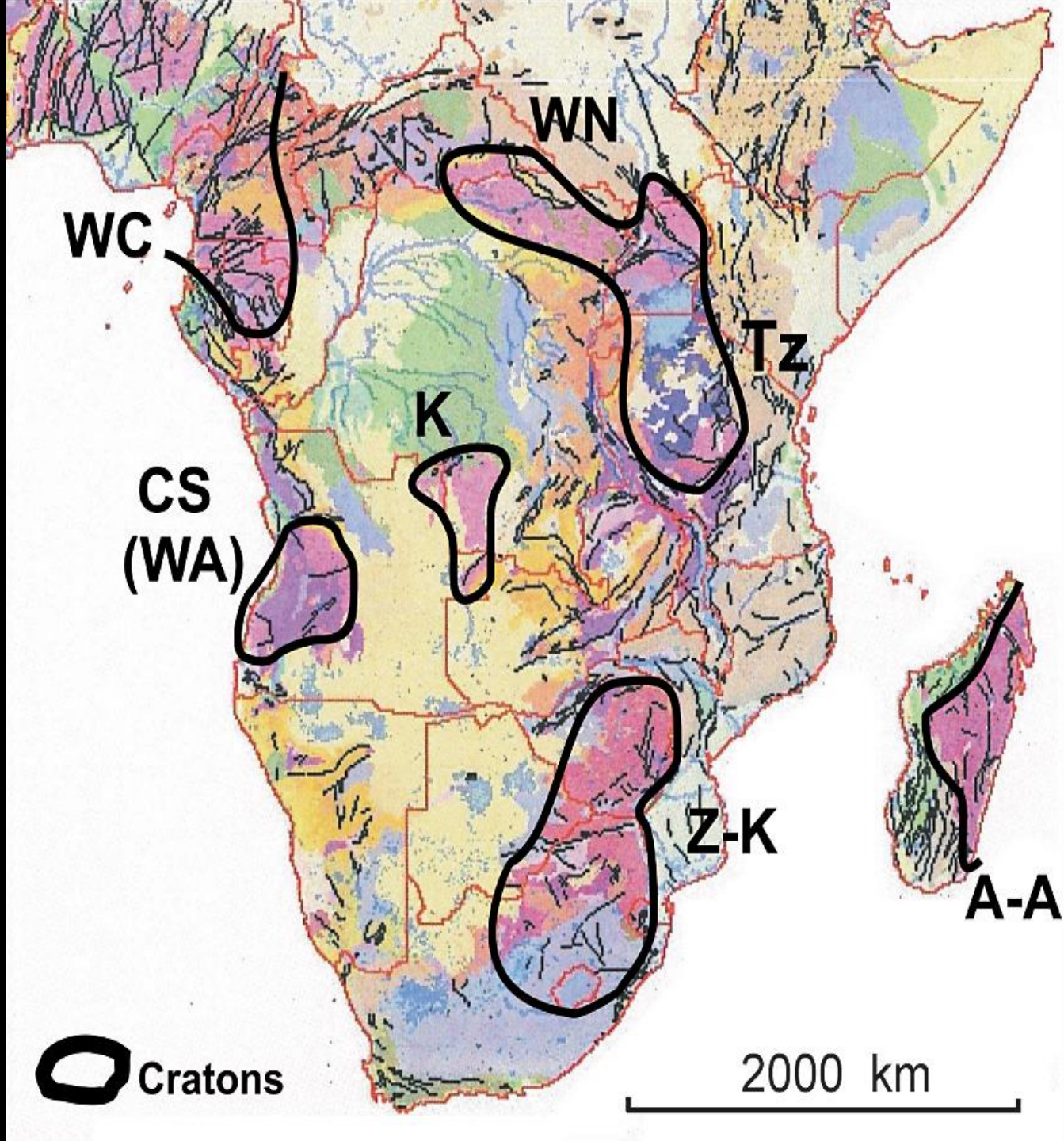
Minéralisation associée aux Kimberlites : le diamant

- Les kimberlites sont la première source de diamant dans le monde.
- Le diamant est une forme métastable du carbone sur Terre, c'est-à-dire qu'il ne devrait pas être stable dans les conditions où on l'observe, à la surface du globe.
- **Il se forme à 150 km de profondeur et plus, à des pressions de l'ordre de 4 GPa et des températures de 1100 à 1200 degrés Celsius**.
- On trouve ces conditions dans le manteau supérieur (enveloppe de la Terre située entre 150 et 670 km de profondeur) constitué d'éclogites et de péridotites ; c'est pourquoi les diamants contiennent des inclusions de grenat, de pyroxène et d'olivine.

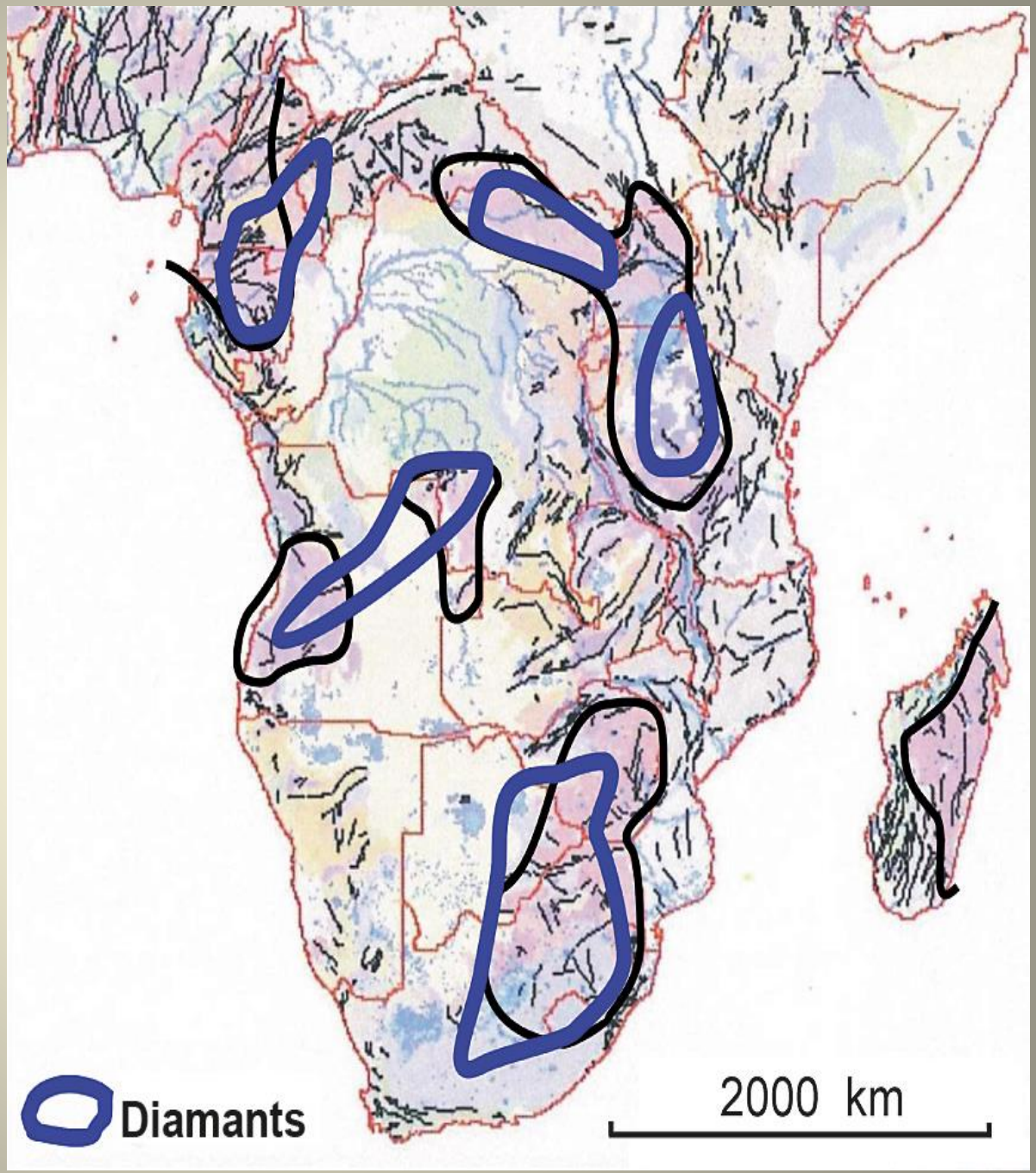
La remonté du diamant à la surface du globe

- Après leur formation, les diamants sont remontés à la surface du globe à la faveur d'éruptions volcaniques dont la source est très profonde.
- Ces éruptions échantillonnent le manteau terrestre et la croûte.
- La particularité de ces éruptions est la vitesse de leur remontée : plusieurs centaines de km/h ! C'est cette vitesse qui empêche le diamant de se transformer en sa forme basse pression-basse température, le graphite.
- Ce type de volcanisme cataclysmique est appelé **kimberlitique** (du nom de la célèbre mine Kimberley en Afrique du Sud).
- Les gisements de kimberlites se trouvent dans les cratons **archéens**, c'est-à-dire des croûtes continentales anciennes (antérieures à **-2,5 milliards d'années**).

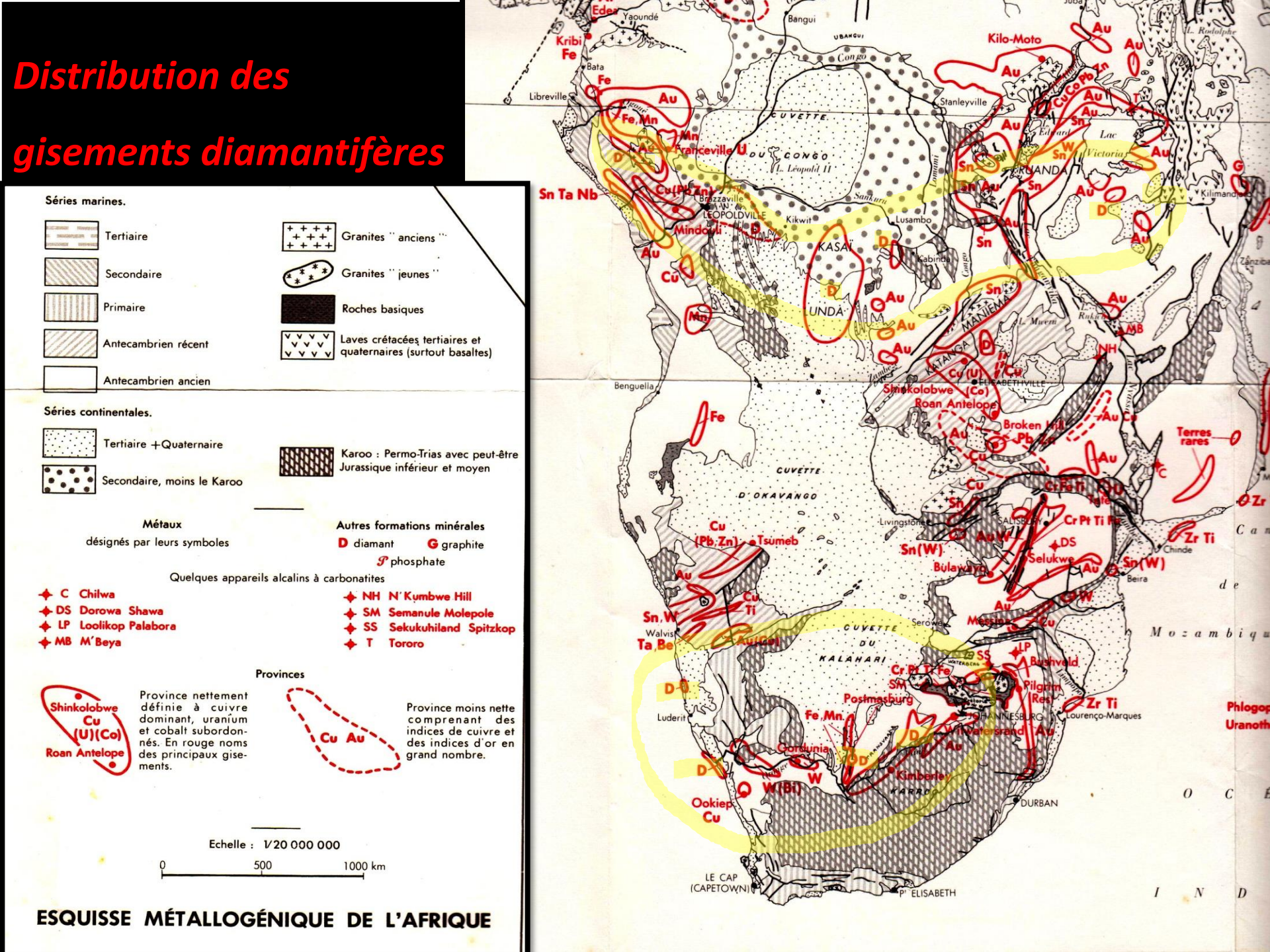
WC : West central African craton ;
WN : West Nile craton ;
Tz : Tanzanian craton ,
K : Kasai craton
CS(WA) : Central Shield (West Angola) craton,
Z-K : Zimbabwe-Kaapvaal craton
A-A : Antananarivo – Antogil craton



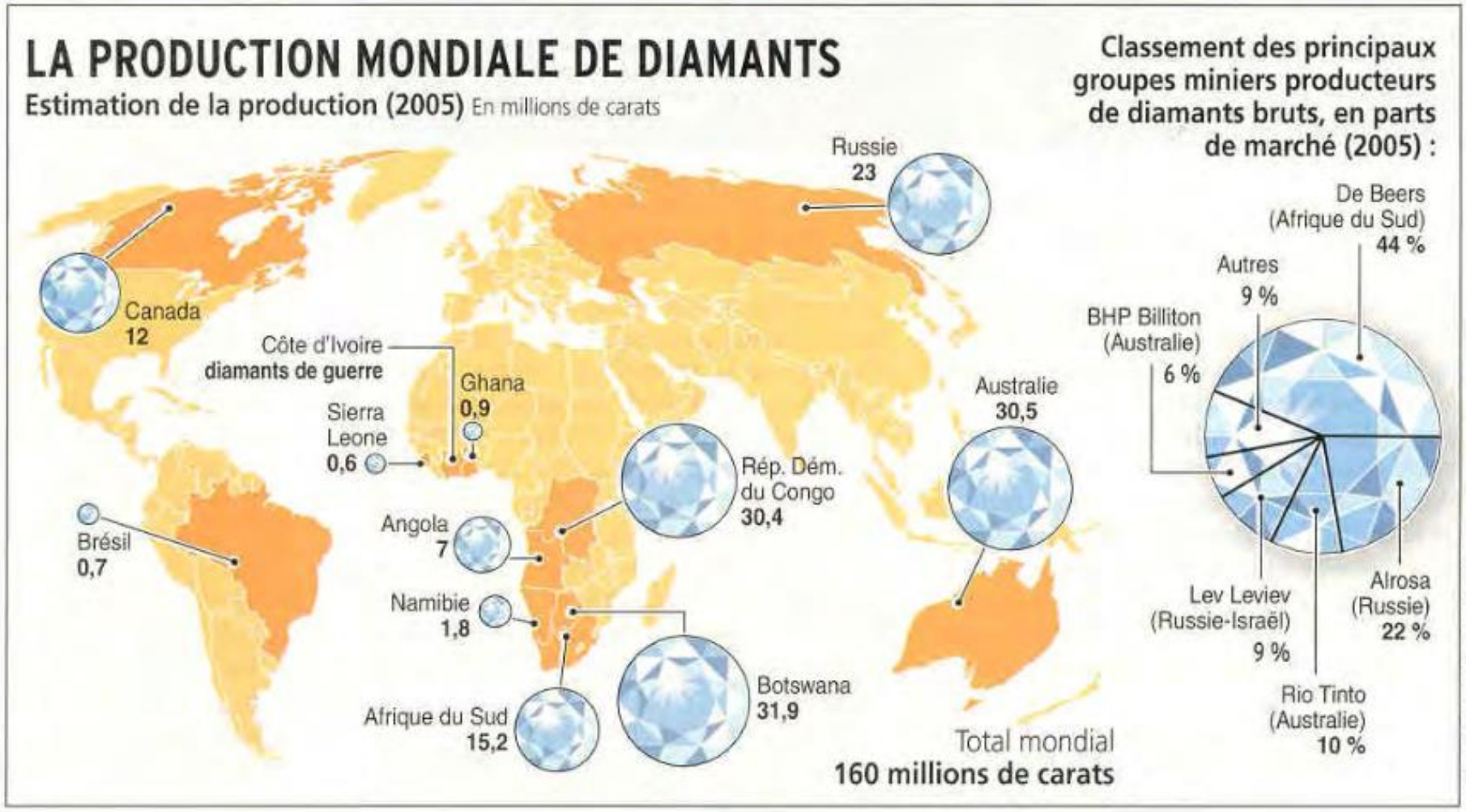
Distribution des gisements diamantifère



Distribution des gisements diamantifères



PRODUCTION ET VALEUR DU DIAMANT



Les minéraux indicateurs sont beaucoup plus abondants dans la kimberlite que ne l'est le diamant. Ils résistent à l'érosion et se distinguent tant à l'œil nu que par leur composition chimique.

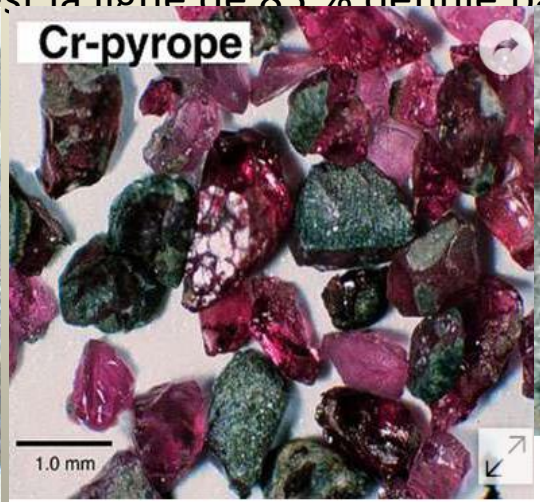
Les minéraux indicateurs sont récupérés dans la fraction de sable moyen à grossier des sédiments et analysés par microsonde électronique pour confirmer leur identification.

Minéraux indicateurs de kimberlites

Les minéraux indicateurs de kimberlites sont :

L'ilménite magnésienne : noire, fracture conchoïdale. L'ilménite est présente dans de nombreuses roches archéennes ainsi que dans la kimberlite. Les ilménites dans les kimberlites se distinguent des autres par leur teneur élevée en MgO, supérieure à 4 % en poids. Chaque kimberlite se distingue par sa signature de Cr_2O_3 en fonction de MgO.

Le **grenat pyrope chromifère** : couleur pourpre, auréole kélyphitique. Les grenats harzburgitiques subalcalins sont associés aux kimberlites diamantifères. On peut les différencier des autres grenats lherzolitiques, harzburgitiques ou dunitiques en traçant le graphique de CaO en fonction de Cr_2O_3. La diagonale qui sépare les grenats lherzolitiques des grenats harzburgitiques est la ligne de 85 % définie par Gurney (1984).



Éclogite et grenat. © C. König

Le **diopside chromifère** : vert pâle à émeraude. Le diopside riche en Cr (> 0,5 % en poids de Cr_2O_3) se distingue par sa couleur verte. Il indique la présence de kimberlite sans toutefois informer sur la présence de diamants.

L'**olivine très magnésienne** : jaune-vert pâle

Pérovskite. © www.fabreminerals.com, *Fabre Minerals photo*

Minéraux traceurs

La méthode des minéraux traceurs est la plus employée en exploration, surtout lors des premières étapes, bien avant les méthodes géophysiques. Utilisée pour la première fois en 1902 pour la cheminée « Premier », en Afrique du Sud, la méthode des minéraux libérés dans l'environnement secondaire (sols, ruisseaux, rivières...) consiste à rechercher des minéraux caractéristiques associés aux kimberlites diamantifères et à remonter à leur source (Bari, H. , 2001).

LA KOMATIITE

Avant les découvertes en Guyane, les géologues pensaient que les pipes se mettaient en place dans les boucliers d'âge précambrien dans des terrains de plus de deux milliards et demi d'années, comme on vient de le voir. La Guyane posait problème. Ces diamants détritiques ne sont pas accompagnés par les autres minéraux caractéristiques des kimberlites et lamproïtes. Avec cette découverte, c'est l'étude des talc-schistes de type komatiite qui est lancée...

La komatiite est un magma, sec et chaud, engendré au cœur de panaches mantelliques à des profondeurs d'au moins 250 kilomètres, en milieu sec. Lorsqu'il débouche en surface, le magma est une émulsion riche en fluides et il doit remonter rapidement pour éviter la graphitisation.

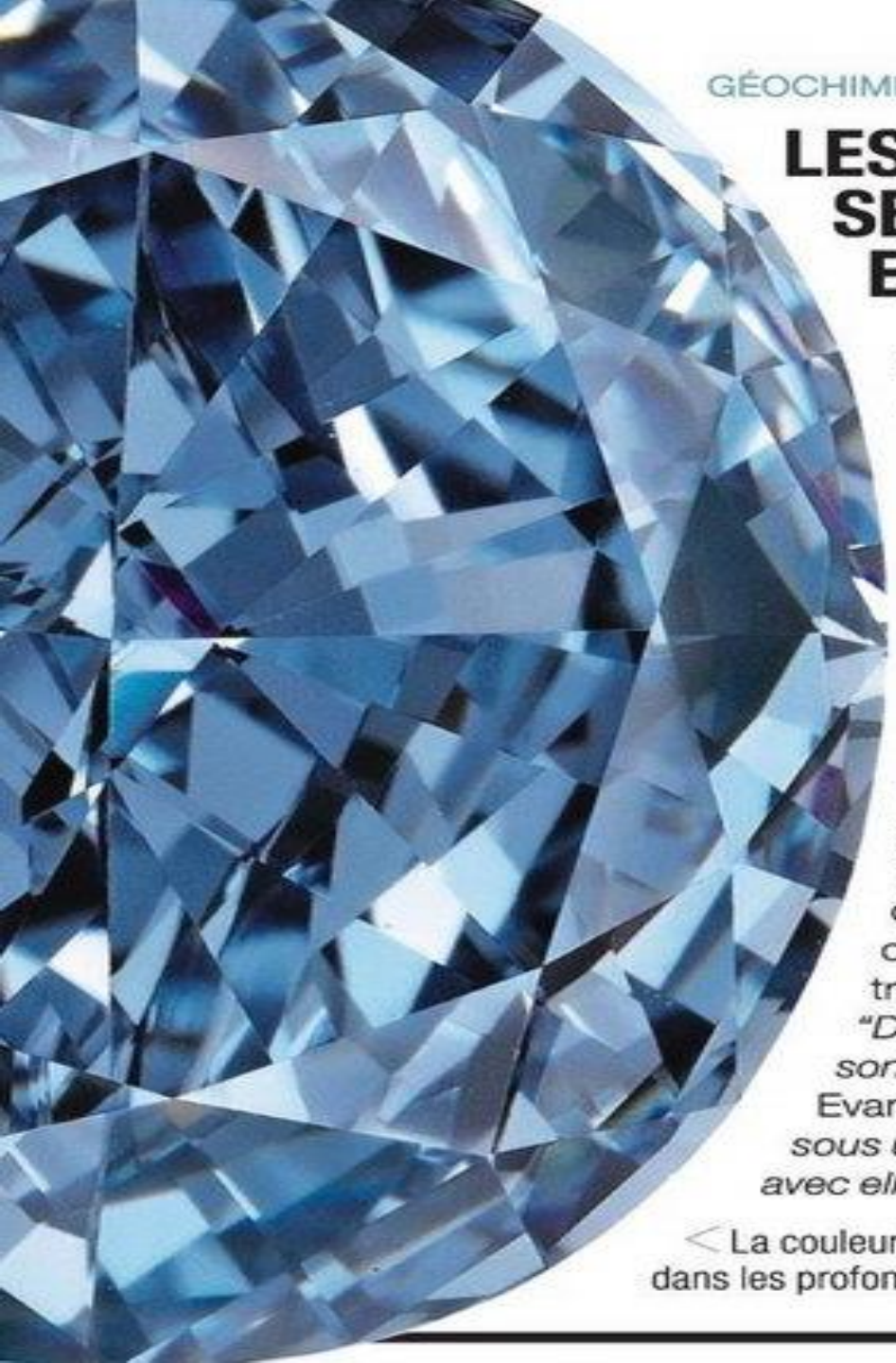
Deux indices indiquent que ces magmas ont traversé une zone de subduction riche en fluides :

- des komatiites métamorphiques, fréquentes dans la ceinture de roches vertes de la Guyane ;
- la forme des diamants et leur composition éclogitique.

Ces magmas naissent au cœur d'un panache mantellique. En remontant lentement dans un premier temps, ils traversent la plaque océanique qui s'enfonce. Ceci a deux conséquences :

le magma entraîne des éclogites et des péridotites ;

le magma se charge en eau, ce qui accélère sa remontée jusqu'à **Mach 2**.

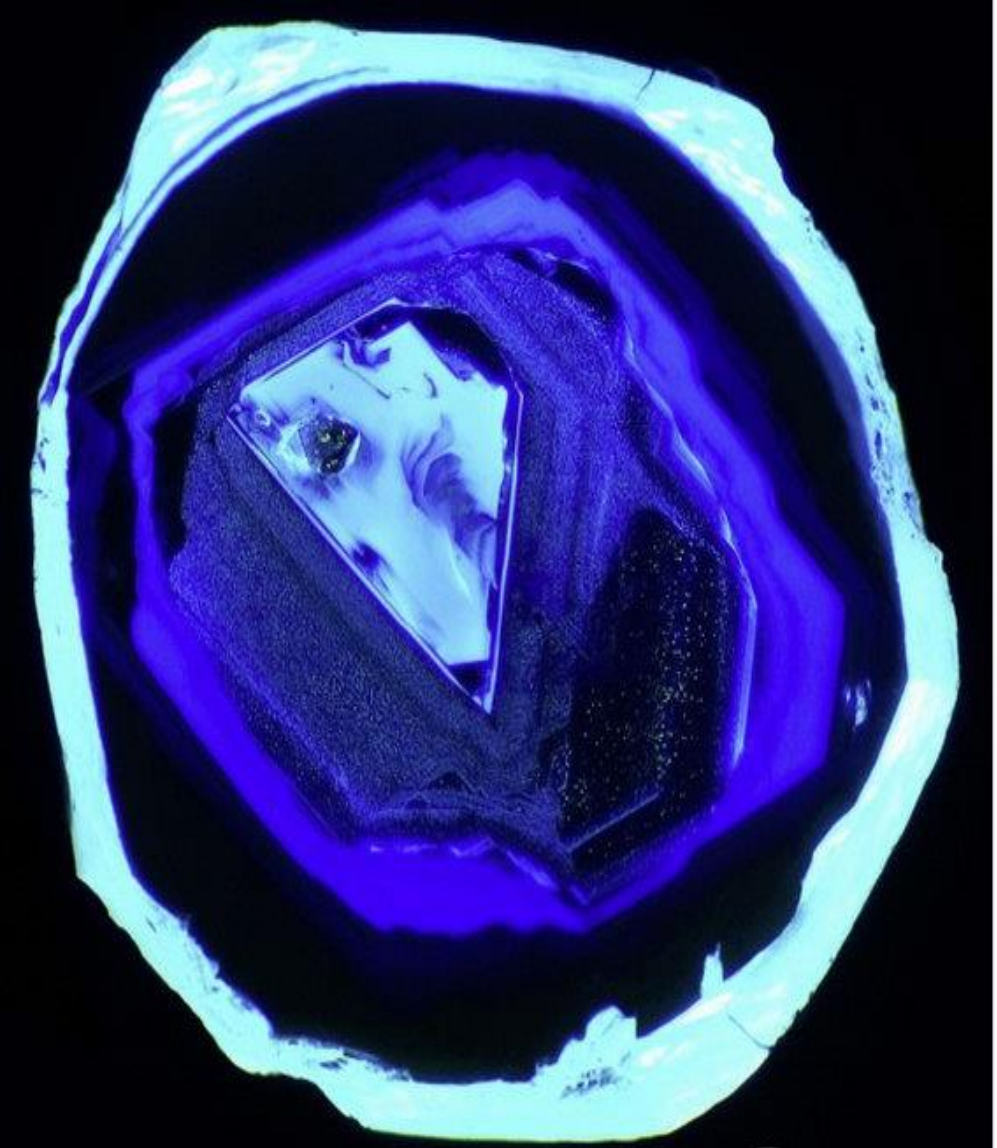


GÉOCHIMIE

LES DIAMANTS BLEUS SE FORMENT ENTRE 400 ET 660 KM SOUS TERRE

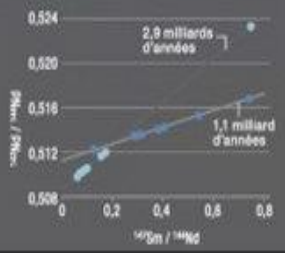
Mais d'où viennent les atomes de bore qui donnent aux diamants bleus leur couleur ? De l'eau de mer enfouie dans les entrailles de la Terre, révèle l'équipe d'Evan Smith (Institut gémologique d'Amérique, New York). Les géologues ont étudié les impuretés de près de 46 diamants bleus, ces éléments piégés au cœur de la pierre lors de sa cristallisation. Ils y ont identifié des minéraux qui ne naissent qu'entre 400 et 660 kilomètres sous la surface de la Terre, soit quatre fois plus profondément que la plupart des autres diamants ! C'est suprenant car le bore y est habituellement très rare. Les chercheurs pensent qu'il vient de l'eau de mer infiltrée dans le plancher océanique, où il aurait été stocké dans des minéraux, puis transporté dans les profondeurs du manteau. *"D'après nos observations, les diamants bleus se sont formés dans les zones de subduction*, précise Evan Smith, *là où une plaque océanique passe sous une autre et plonge dans le manteau, charriant avec elle les minéraux riches en bore marin."* **E.H.**

< La couleur bleue est due à l'eau de mer infiltrée dans les profondeurs du plancher océanique.



UNE MINE MAIS DEUX TYPES DE DIAMANTS

Les géologues ont comparé l'évolution d'isotopes du samarium (Sm) et du néodyme (Nd) trouvés dans les 26 diamants issus de la mine de Venetia, et ont découvert deux populations de diamants : l'une datant de 2,9 milliards d'années, et l'autre, étonnamment jeune, de 1,1 milliard d'années.



Ces diamants qui ne devraient pas exister

La découverte de neuf diamants en Afrique du Sud pose problème : ils sont géologiquement bien trop récents. **Mathilde Fontez** a remonté leur piste.

Il y a peut-être plein de diamants, partout sous nos pieds !", s'exclame la géologue Hélène Bureau. Ce sont neuf de ces pierres découvertes dans une mine d'Afrique du Sud qui viennent de déclencher la prise de conscience. Car ces diamants sont trop jeunes. Si jeunes qu'ils n'auraient pas dû se former à cet endroit. "*C'est un scoop*", analyse la chercheuse à l'Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie, à Paris.

Car la plus précieuse des pierres est le seul accès aux entrailles de la Terre. Seules ces gemmes éternelles sont capables de traverser des centaines de kilomètres depuis leur lieu de naissance, là où la pression et la température sont assez élevées pour forcer les atomes de carbone à adopter cette configuration ultra-compacte, jusqu'à la surface. Ces précieux cristaux sont capables de résister à l'usure de milliards d'années d'érosion, préservant en leur sein de minuscules échantillons des conditions dans lesquelles ils sont nés. Leur réseau cristallin, le plus souvent dépourvu de la moindre trace d'élément radioactif, ne garde pas la mémoire de leur naissance. Mais ils renferment, pour certains, des inclusions : de petits grains de minéraux de quelques microgrammes qui se sont trouvés piégés dans le carbone au moment de la naissance du diamant. Grâce à cela, ces grains sont restés protégés de toute pollution extérieure, privés de toute évolution chimique. Or, ils sont les témoins de l'environnement physico-chimique dans lequel a poussé la pierre : pression, température, composition chimique… et date.

De quoi déduire, partant d'un diamant et de son inclusion, la composition du manteau terrestre, retracer les grands mouvements tectoniques, les événements magmatiques majeurs, confirmer les modèles qui décrivent la Terre profonde… même essayer de se représenter à quoi ressemblait notre planète dans les premières centaines de millions d'années qui ont suivi sa naissance, il y a 4,5 milliards d'années (voir encadré p. 64). "*Les diamants sont nos missions spatiales vers l'intérieur terrestre*", résu-

Repères

Les diamants sont des cristaux d'atomes de carbone qui ne se forment qu'à des pressions et températures très élevées – 1 000 °C et 50 000 fois la pression atmosphérique. Des conditions qu'on ne trouve qu'à plus de 150 km de profondeur. Ils remontent via des éruptions très violentes : le magma atteint les quelque 2 000 km/h à l'approche de la surface.

M. GRESS - M. JUGNITENTE

ment dans un article de synthèse George Harlow et Rondi Davies, deux spécialistes du sujet au Museum d'histoire naturelle de New York.

C'est pour reconstituer l'histoire de l'un des plus vieux morceaux de croûte terrestre, cet extrême sud de l'Afrique datant d'au moins 2,5 milliards d'années, que Janne Koornneef, Gareth Davies et leur équipe de l'université d'Amsterdam passent, il y a dix ans, un accord avec les entreprises d'exploration de diamants DeBeers et Debswana. *"L'idée était de comprendre comment le manteau en dessous de ces vieilles parties du continent s'est formé, développé, et quels processus ont finalement conduit à la formation des diamants qui sont maintenant minés dans la région"*, relate Gareth Davies.

De précédentes études avaient été menées sur des centaines de diamants qui montraient que les pierres de cette région dataient de 2 milliards d'années, mais Janne Koornneef et Gareth Davies ont des doutes. Ils choisissent alors de se focaliser sur un petit échantillon, et de procéder à une datation individuelle... *"Les méthodes d'analyse ont gagné en précision*, explique la chercheuse. *Elles nous permettent d'analyser les inclusions individuellement."* Bingo : les géologues trouvent dans le gisement deux populations bien distinctes. La majorité des 26 diamants analysés se voient attribuer l'âge classique de 3 milliards d'années, mais neuf se distinguent par leur composition : ils sont plus pauvres en calcium, en carbone 13, et la datation réalisée grâce aux isotopes radioactifs du samarium et du néodyme révèle qu'ils datent... de 1,1 milliard d'années seulement. Les chercheurs exposent comment ces pierres ont pu remonter des profondeurs à la faveur d'une violente remontée de magma nommée "événement Umkondo". *"Cet événement avait déjà été décrit*, précise Gareth Davis. *Mais pour avoir pu donner des diamants, il doit avoir été plus extrême, plus chaud que nous ne le pensions jusque-là."*

Ce que racontent les plus vieux diamants de la Terre

Ils sont vieux de 4,25 milliards d'années. Ils se sont donc formés seulement 300 millions d'années après la naissance de la Terre! Ces diamants hors d'âge ont été découverts en 2008, dans la région des Jack Hills, en Australie (voir *S&V* n°1084). Ils détiennent toujours le record, et les géologues continuent à les faire parler pour raconter l'histoire primordiale de notre planète. Grâce à eux, on découvre que l'enfance de la Terre s'est rapidement refroidie. Les analyses montrent en effet que les diamants sont nés dans une croûte semblable à celle qui se trouve sous nos pieds aujourd'hui, et en présence d'eau, donc des océans. Reste à comprendre si la tectonique des plaques était déjà en place – les analyses sont en cours...

DES DATATIONS À REVOIR

Cela questionne les analyses effectuées dans le passé. Si des diamants jeunes se sont cachés dans ce gisement, n'y en a-t-il pas d'autres partout dans le monde? En datant les diamants en groupes, les géologues pourraient avoir raté toute une partie de l'histoire géologique de la Terre. *"On va devoir reprendre les datations*, acquiesce Hélène Bureau. *Nombre des diamants trouvés jusqu'ici sont peut-être plus jeunes qu'on ne le pense."*

Partout dans le monde, des remontées de magma pourraient avoir été plus violentes que ce que l'on imaginait. Partout dans le monde, pourraient se cacher de nouveaux types de gisements. Janne Koornneef et Gareth Davies vont maintenant étudier d'autres diamants, en Afrique du Sud et ailleurs. *"Nous pouvons nous attendre à en trouver de similaires en Afrique de l'Ouest – en Angola, au Sierra Leone, en Côte d'Ivoire – mais aussi au Brésil..."* énumère Gareth Davies.

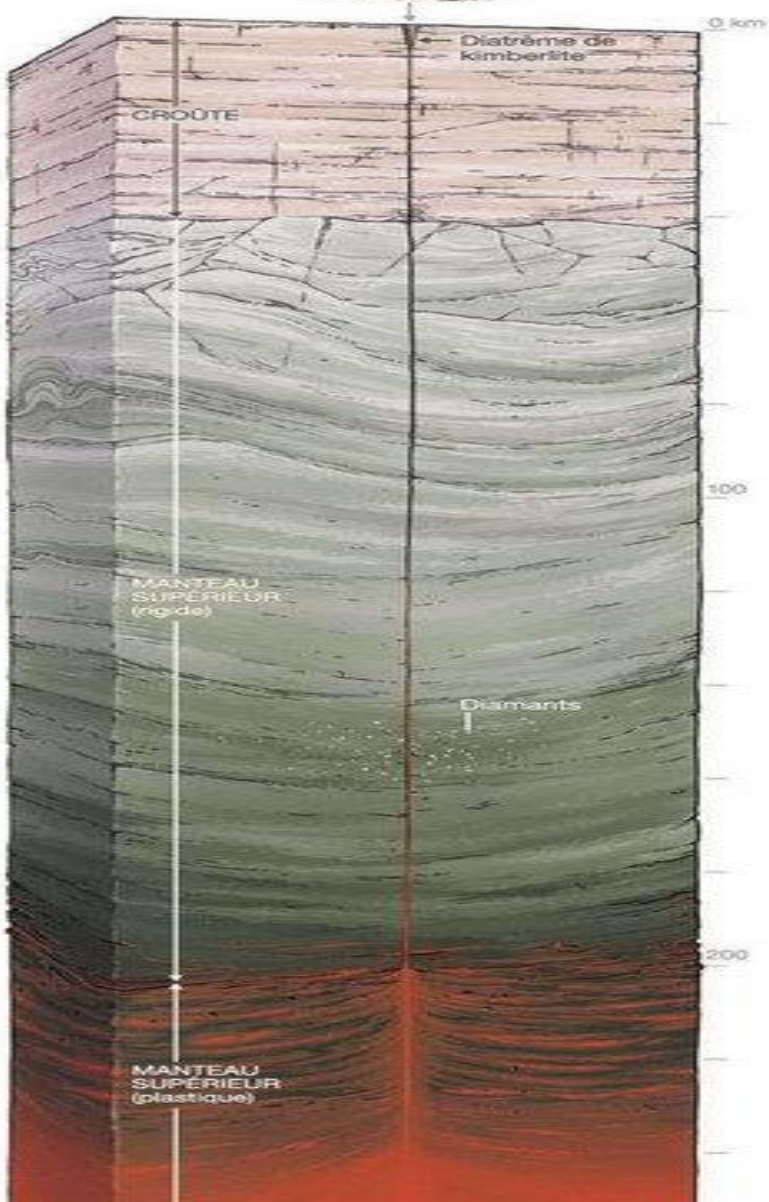
Et l'on ne peut s'empêcher de rêver à ces rivières de diamants jusqu'ici insoupçonnées qui couleraient juste là, tout près... sous nos pieds.

A consulter : la publication de Janne Koornneef et Gareth Davies.

La plante qui repère les diamants

Au Liberia, on trouve des diamants dans les rivières et les ruisseaux depuis environ quatre-vingts ans. Mais l'emplacement des pierres précieuses semblait aléatoire jusqu'à une découverte de Stephen Haggerty, géologue à l'Université internationale de Floride. En prospectant dans la forêt vierge du nord-ouest du pays, il est tombé sur une plante ressemblant à un palmier couvert d'épines et appartenant sans doute à la famille des pandanus. « Elle pousse dans des bosquets touffus littéralement impénétrables », explique Haggerty. Les analyses du sol ont confirmé que ces plantes ne poussaient qu'au-dessus des diatrèmes de kimberlite, une roche volcanique connue pour parfois contenir des diamants en surface (voir explications à droite). La présence des plantes signale donc les endroits susceptibles de receler des pierres précieuses. *–A.R. Williams*

UNE GÉOLOGIE PROMETTEUSE
Les vastes régions d'Afrique où la croûte continentale est ancienne et épaisse sont de potentiels territoires diamantifères. La chaleur et la pression extrêmes des profondeurs y ont transformé le carbone en joyaux étincelants.



SOL FERTILE
Des millions d'années d'érosion ont décomposé la kimberlite pour former un sol riche en minéraux. Une plante appelée localement *parnaya* semble prospérer uniquement dans ce type d'endroit, indiquant la possible présence de diamants.

ÉRUPTION
En atteignant la croûte terrestre, le magma a surgi en surface. Il s'est ensuite solidifié sous la forme d'une roche appelée kimberlite, qui peut contenir des diamants emportés en chemin.

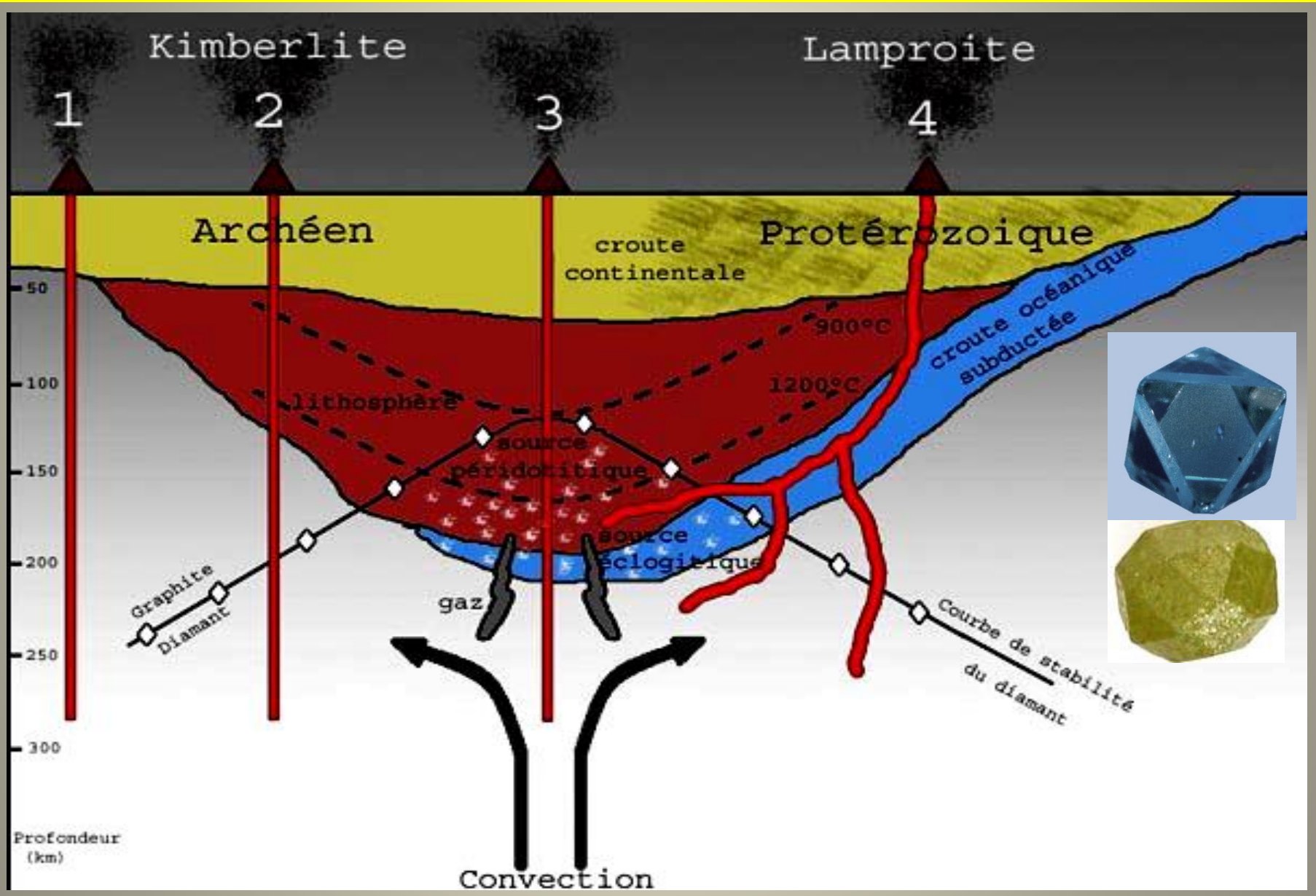
EN ROUTE VERS LA SURFACE
Propulsé par les gaz qui se sont échappés de sa masse chaude, le magma est remonté par la cheminée. Sa progression a été rapide, n'exigeant que quelques jours, voire quelques heures.

UN CHAMP DE JOYAUX
En remontant dans la cheminée, le magma a emporté des pierres précieuses qui se trouvaient à environ 160 km sous terre. Les diamants s'étaient sans doute formés là, il y a parfois près de 3 milliards d'années.

ORIGINES PROFONDES
Le magma a charrié les diamants vers la croûte terrestre en Afrique de l'Ouest, il y a environ 100 millions d'années. La roche en fusion est remontée du manteau, mais on ignore de quelle profondeur exactement.

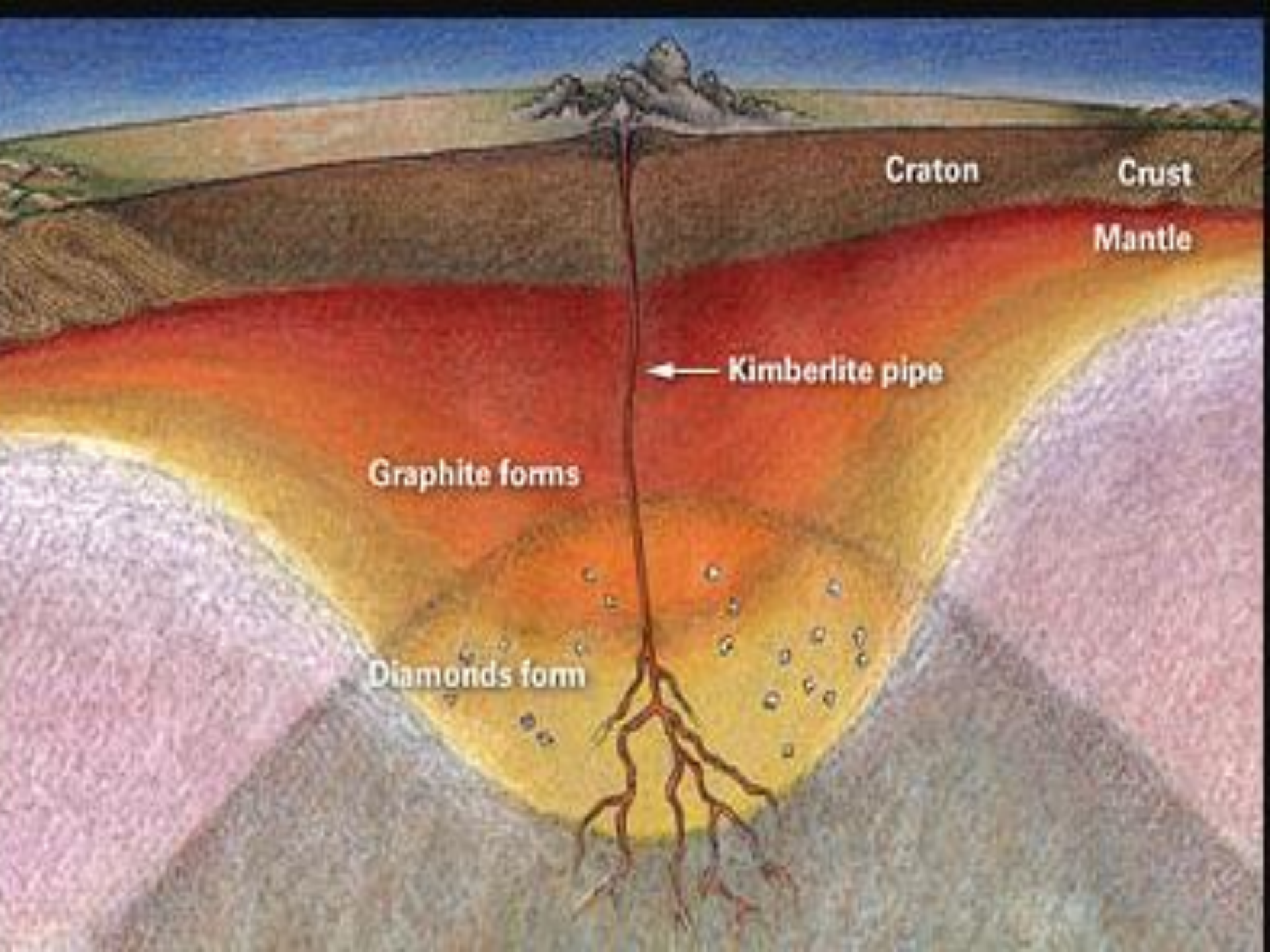
MATTHEW TWOMBLY ET RYAN WILLIAMS, ÉQUIPE DU NGM. SOURCES : STEPHEN HAGGERTY ; BRUCE KJARSGAARD

Les kimberlites

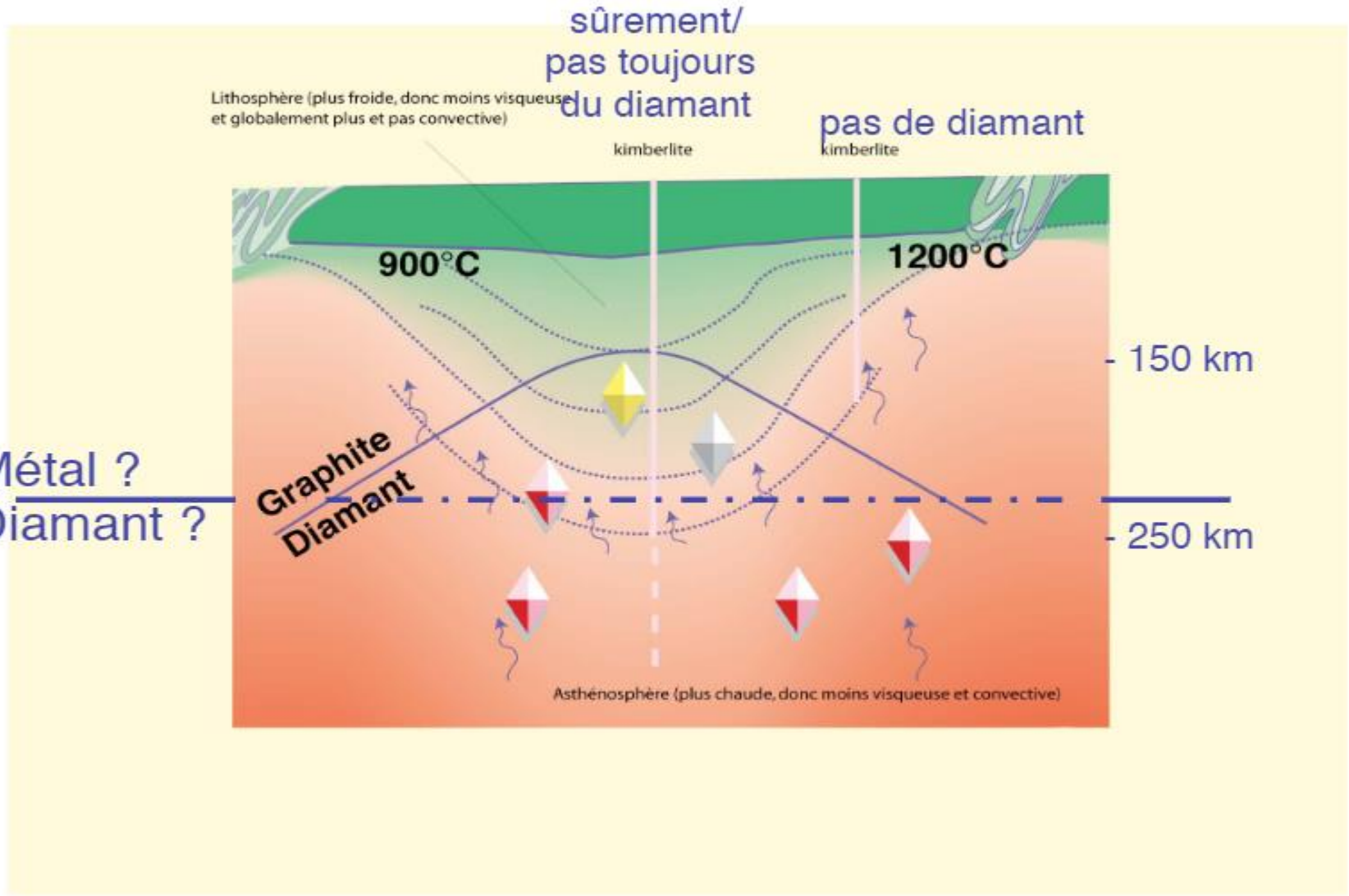


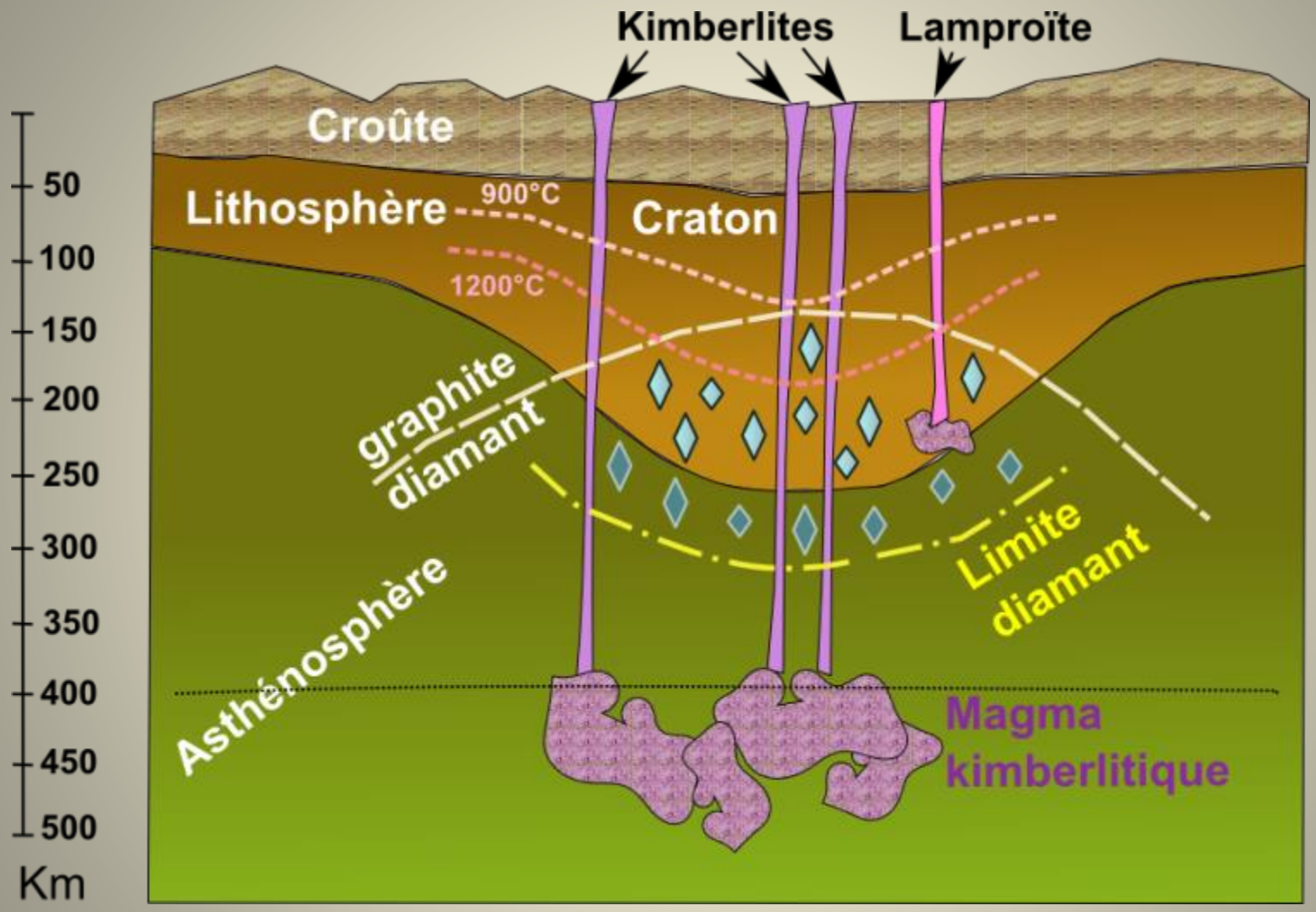
Coupe schématique de quatre gisements kimberlitiques et lamproïtiques

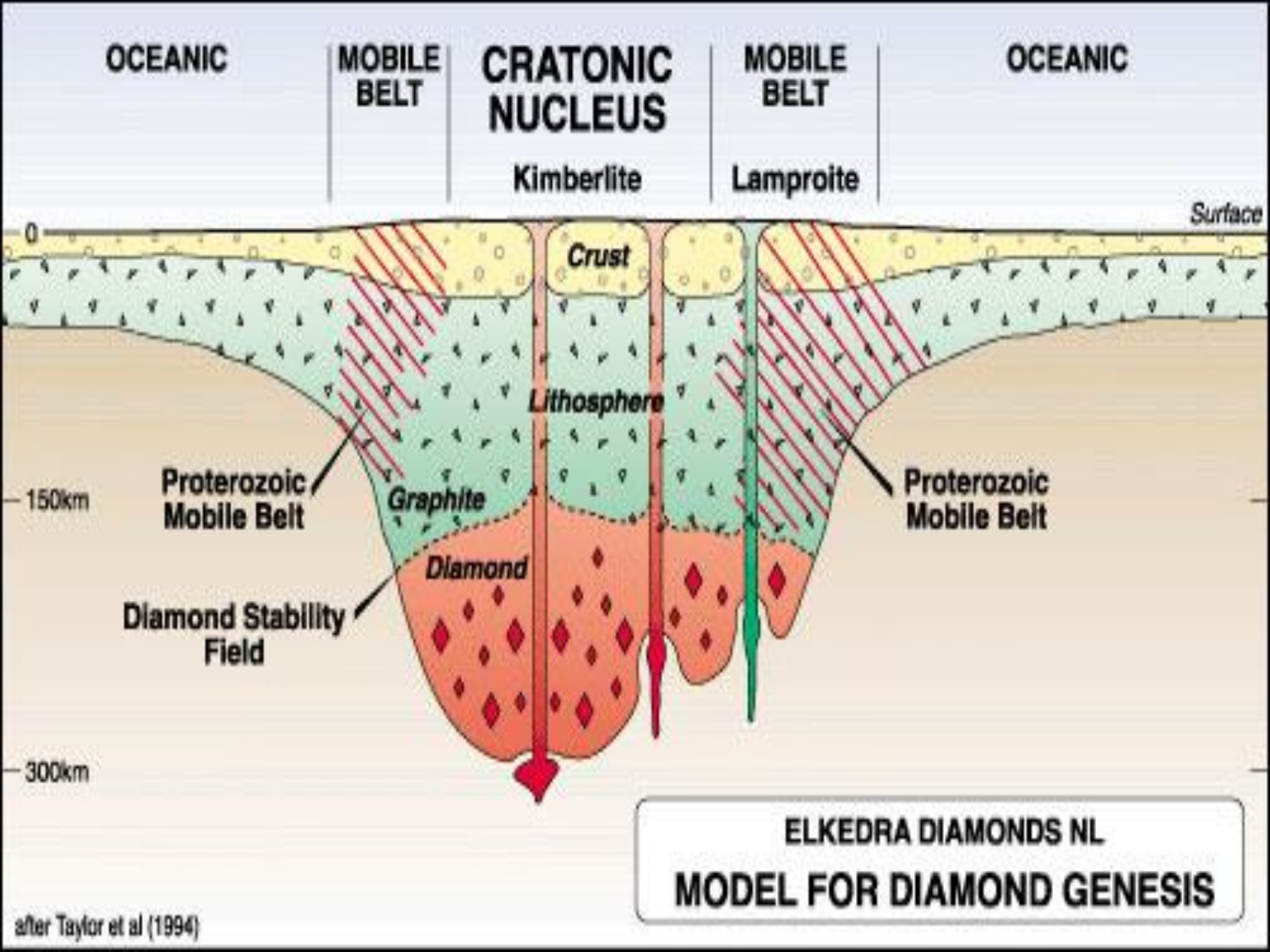
- les gisements 1 et 2 sont stériles, car ils ne traversent pas de zones de stockage des diamants.
- Les deux sources de diamants sont représentées : **péridotitique et éclogitique**.
- Les diamants sont stockés dans leur zone de stabilité, sous les croûtes continentales anciennes et profondes de l'Archéen (gisement 3) et du Protérozoïque (gisement 4).


Craton
Crust
Mantle
Kimberlite pipe
Graphite forms
Diamonds form

Une vision classique de l' échantillonnage des diamants par les kimberlites




Kimberlites
Lamproïte
Croûte
Lithosphère
900°C
Craton
1200°C
graphite
diamant
Limite
diamant
Asthénosphère
Magma
kimberlitique
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
Km


OCEANIC
MOBILE BELT
CRATONIC NUCLEUS
Kimberlite
MOBILE BELT
Lamproite
OCEANIC
Surface
0
Crust
Lithosphere
Proterozoic Mobile Belt
Graphite
Diamond
Diamond Stability Field
Proterozoic Mobile Belt
150km
300km
ELKEDRA DIAMONDS NL
MODEL FOR DIAMOND GENESIS
after Taylor et al (1994)