

Trois minéraux représentatifs du Brésil

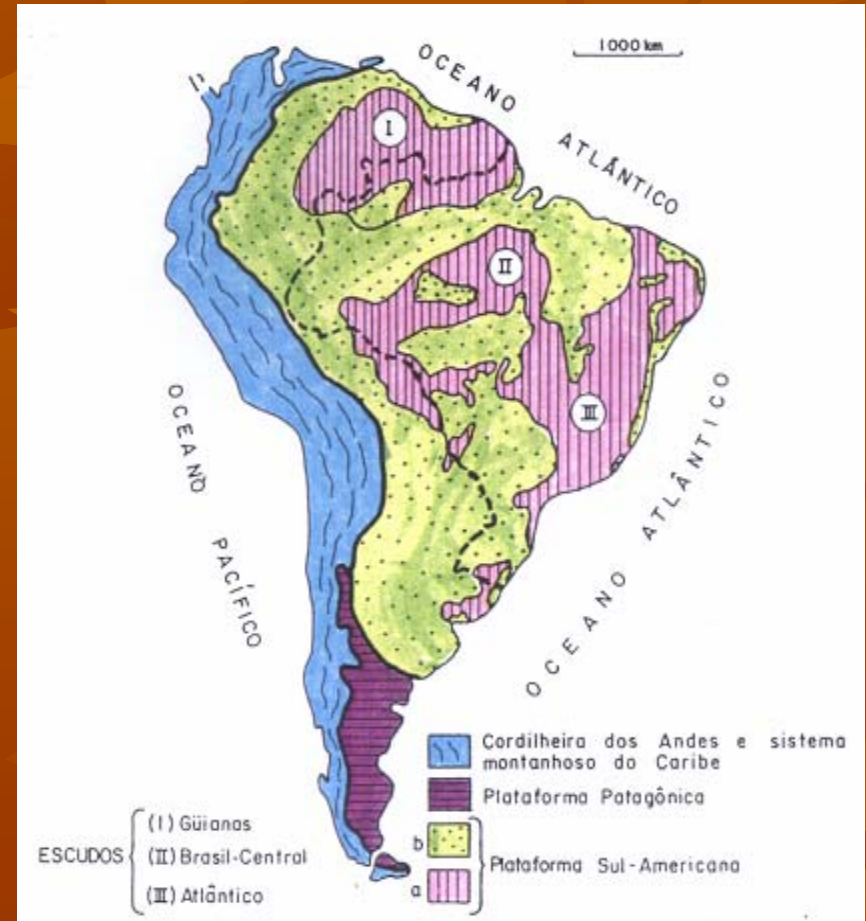
- Améthystes : exploitations artisanales d'Ametista do Sul (Rio Grande do Sul)
- Minerai de fer : mines de Vale à Itabira (Minas Gerais)
- Emeraudes : mine de Canaa (Minas Gerais)

Emplacement des trois gisements analysés



I-Rappels sur la géologie régionale de la plate forme sud américaine

- L'Amérique du Sud est constituée de trois grands ensembles structuraux :
 - la Cordillère des Andes
 - la plate-forme Patagonienne
 - la plate-forme sud-américaine
- Le Brésil est intégralement situé sur le territoire de la plate-forme sud-américaine
- La plate-forme sud-américaine comporte trois boucliers anciens soudés, séparés par des bassins sédimentaires :
 - Güianas
 - Brésil central
 - Brésil Atlantique



Source : Departamento nacional da produção mineral do Brasil - Principais Depósitos Minerais do Brasil, Vol. II, III, IV 1986, 1988, 1989

Géologie plate-forme sud-américaine

a. archéen

- **3,2 à 3,4 Ga** : apparition des premières roches connues de la plate-forme
- Roches magmatiques, mafiques et ultramafiques
- Complexes de roches volcano-sédimentaires (*green stone belt*)
- **2,6 Ga** phase tectono métamorphique de *Jequie-Aroense*, à faciès variables (granulites et schistes verts)

b. protérozoïque

**Période séparée par 3 phases tectono-métamorphiques,
toutes à faciès amphibolites - schistes verts**

- **A partir de 2,5 Ga, plate-forme continentale (bassins de marge passive)**
 - Formations détritiques (*witwatersrand*), complexes volcano-sédimentaires « *green stone belt* » avec formations ferrifères (*Itabirites*)
 - Migmatogénèse intense, associée à des intrusions granitiques
 - **Vers 1,9 Ga, phase tectono-métamorphique rétrograde Transamazonienne ou Minas**
 - **A partir de 1,5 Ga, sédimentation détritique continentale et marine de plateforme («*rift d'Espinhaço*»)**
 - Magmatisme basaltique alcalin, roches ultrabasiques et granites anorogéniques
 - **Vers 1,1 Ga, phase tectono-métamorphique d'Espinhaço-Uruacuano**
- **A partir de 1 Ga, sédimentation de plateforme pélitique et carbonatée**
 - Glaciation de *Jequitai* avec dépôts de tillites
 - **Vers 700 - 600 Ma, phase tectono-métamorphique, Brésilienne ou Panafricaine**
 - Production intense de granites avec migmatisations, qui se poursuit dans le Paléozoïque jusqu'à ~ 450 Ma.
 - **C'est le début de la cratonisation de la plateforme et de la formation du Gondwana**

c. du primaire au quaternaire

■ Paléozoïque

- Cratonisation de la plate-forme par épaissement de la croûte
- Mise en place de 3 bassins intracratoniques à sédimentation continentale et marine (Amazonie, Paranaíba et Parana) jusqu'au quaternaire
- Deux épisodes de glaciation (Cambrien et Permo-Carbonifère)

■ Mésozoïque

- Extension de la plate-forme sud américaine
- Ouverture progressive de l'océan Atlantique (Crétacé)
- Individualisation de la plate-forme, qui se sépare de l'Afrique
- Événements magmatiques intenses (basaltes, carbonatites et kimberlites)

■ Cénozoïque

- Erosion de la plate-forme, latéritisation, sédimentation détritique dans des bassins résiduels
- Volcanisme basaltique

■ Quaternaire

- Erosion, sédimentation détritique (éluvions, pédiments, alluvions et sables côtiers)

II- Améthystes : exploitations artisanales d'Ametista do Sul (Rio Grande do Sul)



Améthystes - Introduction

- La ville d'Ametista do Sul est située au nord de l'état du Rio Grande do Sul, sur un plateau constitué de roches basaltiques, d'une épaisseur pouvant aller jusqu'à 1000 m. Ces roches contiennent des géodes d'améthystes, agates et autres minéraux (calcite, gypse, zéolites).
- Dès le 19ème siècle, la région fut prospectée par des allemands immigrants d'Idar-Oberstein, exploitants d'améthystes et agates, et tailleurs de pierres fines de la vallée de la Nahe,
- Concernant Ametista do Sul, l'exploitation commença en surface dans les années 1930, puis des mines souterraines furent développées à partir de 1973.
- Les gisements couvrent aujourd'hui une surface de 16500 ha (sur la base des surfaces déclarées des demandes de permis).

A- Gitologie - minéralisations

1. *Gitologie*

- Minéralisations présentes en haut du plateau, plus précisément sur les collines ayant résisté à l'érosion
- Aucune minéralisation dans les vallées
- Roches silicifiées (notamment grès « agatisés ») dans les couches supérieures des collines qui ont résisté à l'érosion
- contrairement aux zones voisines de basaltes « purs », où pyroxènes et plagioclases se sont érodés plus facilement.

Coupe d'une coulée de lave minéralisée typique

- - 1 - Couche superficielle d'1m de grès silicifié (parfois),
- - 2 - Zone de brèche volcanique, épaisseur 1 à 7 m : fragments irréguliers de grès rougeâtre finement grenu + morceaux anguleux de basalte amygdaloïde, formant un conglomérat fortement silicifié, quelques lentilles de grès rougeâtre fortement silicifié au dessus de la zone amygdaloïdale.
- - 3 - Zone amygdaloïdale, épaisseur 3 à 4 m : basalte amygdaloïdal légèrement gris, vésicules diamètre maximum 3 cm remplies de céladonite et de calcédoine
- - 4 - Zone horizontale du toit, épaisseur 1 à 2 m : basalte finement grenu, gris sombre, petites vésicules, joints horizontaux denses et bien définis
- - 5 - Zone minéralisée, épaisseur environ 3 m : basalte massif, gris sombre à gris verdâtre, géodes partiellement remplies d'améthystes, quartz, calcédoine, zéolites, etc...
- - 6 - Zone intermédiaire, épaisseur environ 10 m : basalte gris sombre, avec joints verticaux bien espacés
- - 7 - Zone horizontale de base, épaisseur 2 à 3 m : basalte gris sombre finement grenu, avec interfaces horizontaux en saillie.

Bibliographie: Gemstones of Brazil, Geology & Occurrences, P.J.V. Delaney, Revista Escola de Minas Ouro Preto, 1996

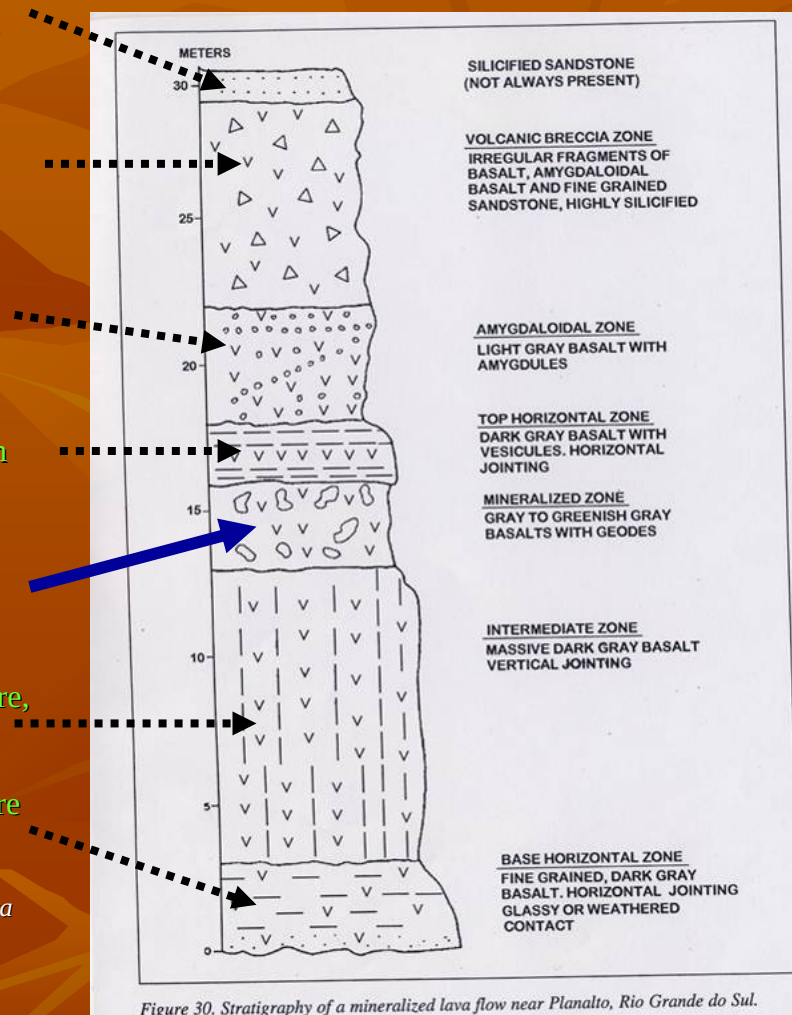


Figure 30. Stratigraphy of a mineralized lava flow near Planalto, Rio Grande do Sul.

La couche de lave minéralisée

- Dans la region d'Ametista
 - Couche minéralisée de faible puissance (2 à 3m) avec géodes dans les zones de basalte tendre (critère de prospection utilisé par les mineurs.)
 - Fort degré d'argilisation du basalte de la zone minéralisée, par transformation in situ des pyroxènes en smectites
 - Altération rapide du basalte après exploitation au bout de deux ans : transformation en granulats, utilisés comme correcteurs de sols, comme les zéolites.
- Dans d'autres régions du cône sud américain, exploitation de la partie supérieure des coulées, très vacuolaire :
 - agates (gisements de Salto de Jacui, au sud d'Ametista)
 - zéolites et améthystes en petites géodes (*gisements de Chopinzinho dans l'état du Parana, et de Toldinho, dans l'état de Santa Catarina*).
 - basalte de ces niveaux généralement altéré : exploitation en carrière avec moyens légers.

A- Gitologie - minéralisations

2. *Les géodes - les formes des géodes*

- Dimensions : de 10cm à 2m dans les garimpos d'Ametista.
- Rappel : dans la Serra do Mar (Rio Grande do Sul), découverte en 1900 d'une géode de 10 x 5 x 3 m !
- Formes des géodes :
 - lentilles plus ou moins allongées, souvent ellipsoïdales, ou en tubes cylindriques
 - polyèdres de formes diverses

Les formes des géodes

- Lentilles plus ou moins allongées, souvent ellipsoïdales, ou en tubes cylindriques
- Ces formes suggèrent fortement le remplissage de cavités de dégazage formées en fin de processus de refroidissement de la lave...



Les formes des géodes

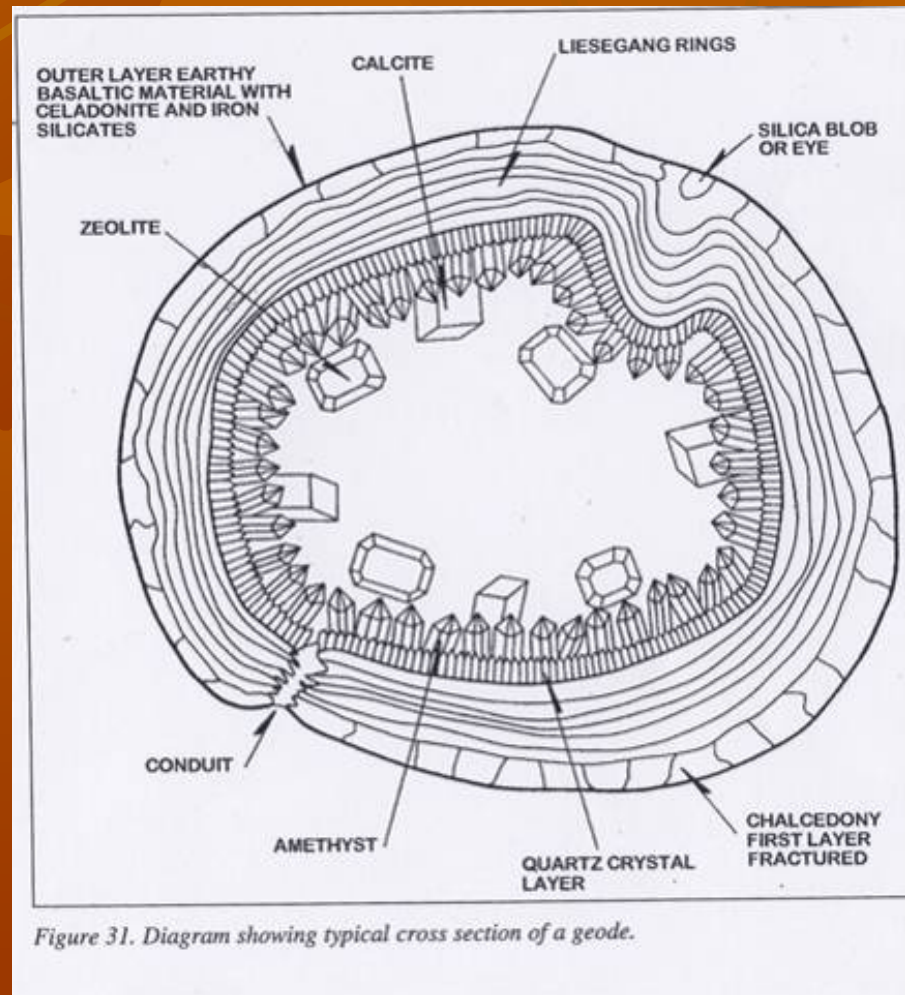
- Polyèdres de formes diverses
- Le basalte est fortement altéré (processus d'argilisation)



2. Les géodes -Le contenu des géodes

- Coupe schématique d'une géode avec 6 zones concentriques, depuis l'extérieur :
- - a- Zone externe rugueuse de matériau basaltique terreux, avec souvent céladonite, zéolites altérées et autres silicates ferrifères
- - b- Couche peu développée de calcédoine, souvent fracturée
- - c - Taches et « yeux » de silice recouvrant les fractures
- - d - Anneaux de jaspe, calcédoine et calcite (liesegang rings)
- - e - Couche de cristaux de quartz et d'améthystes, grossièrement perpendiculaires à la surface
- - f - Croissance erratique de cristaux de calcite, zéolites et gypse

- Bibliographie: Gemstones of Brazil, Geology & Occurrences, P.J.V. Delaney, Revista Escola de Minas Ouro Preto, 1996



Le contenu des géodes



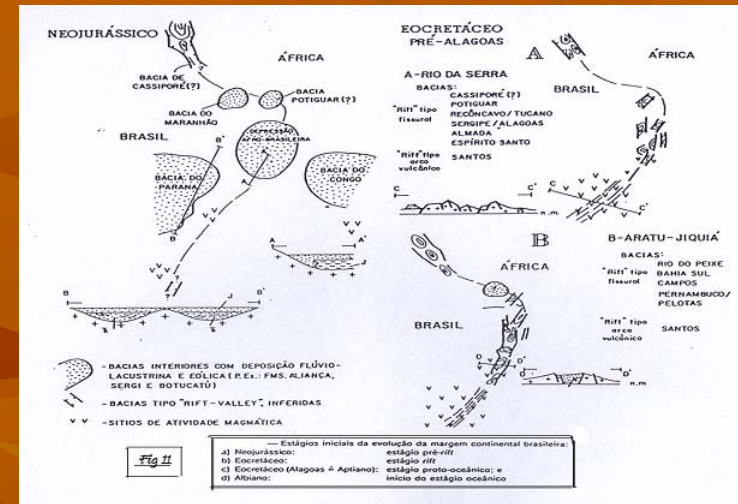
- Cristaux de quartz : formation à partir de solutions chaudes, enrichies par le fer du basalte percolé, riche en ferromagnésiens (augite, pigeonite...)
- Quartz initialement à faible teneur en fer, incolore ou légèrement jaunâtre.
- Couleur améthyste violet profond, après irradiation, pendant des millions d'années, causée par le K_{40} présent dans la roche hôte.
- Cristallisation des minéraux (quartz, agate, calcite, gypse et zéolites) vers $50^{\circ}C$ à partir des ions dissous dans les fluides chauds (Si^{4+} , Ca^{2+} , CO_3^{2-} , SO_4^{2-}).

B- Contexte géologique des améthystes

a. Origine des trapps sud américains

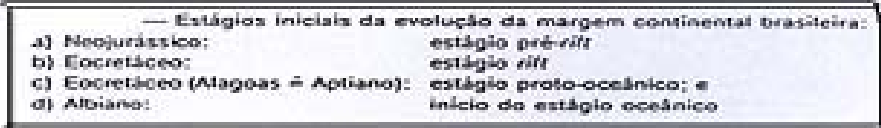
- Démantèlement du Gondwana début Jurassique
- Poursuite au Crétacé par l'ouverture de l'océan atlantique et dérive de la plaque sud américaine vers l'ouest.
- Séparation en 4 phases, avènement des trapps en dernière phase

Les 3 premières phases



Source : Departamento nacional da produção mineral do Brasil - Principais Depósitos Minerais do Brasil, Vol. II, III, IV 1986, 1988, 1989

- **Phase pré-rift (Trias-Jurassique inf. à moy.)**
 - Création de bassins intracratoniques (sédimentation continentale, fluvio-lacustre, éolienne), et de bassins type *rift valley* avec volcanisme intrusif
- **Phase de rifting (Jurassique sup.-Crétacé inf.)**
 - Fracturation de la croûte et volcanisme, création de bassins sédimentaires subsidés (type fissural ou arcs volcaniques)
- **Phase proto-océanique (Aptien)**
 - Affinement de la croûte, création d'un golf subsident avec dépôts d'évaporites
 - Volcanisme (São Paulo), affleurement de la croûte dans l'océan en formation
 - Mise en place au nord de failles transformantes (séparation *Lawrasia-Gondwana*).

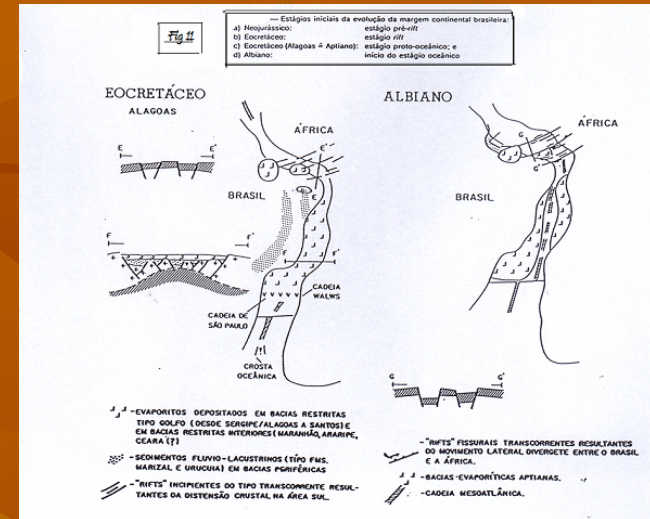


a. Origine des trapps sud américains (suite)

4ème phase avec apparition des trapps

Phase océanique (Albo-Cénomanién)

- Création de la chaîne volcanique médio-atlantique (magmas basaltiques).
- Intense sédimentation terrigène dans les bassins intra-cratoniques
- Sédimentation continentale et marine, dans les bassins installés sur la marge continentale (avec dépôt d'hydrocarbures actuellement exploités off shore).



Source : Departamento nacional da produção mineral do Brasil - Principais Depósitos Minerais do Brasil, Vol. II, III, IV 1986, 1988, 1989

En parallèle, mise en place :

- des basaltes tholéitiques (trapps hôtes des gites d'améthystes),

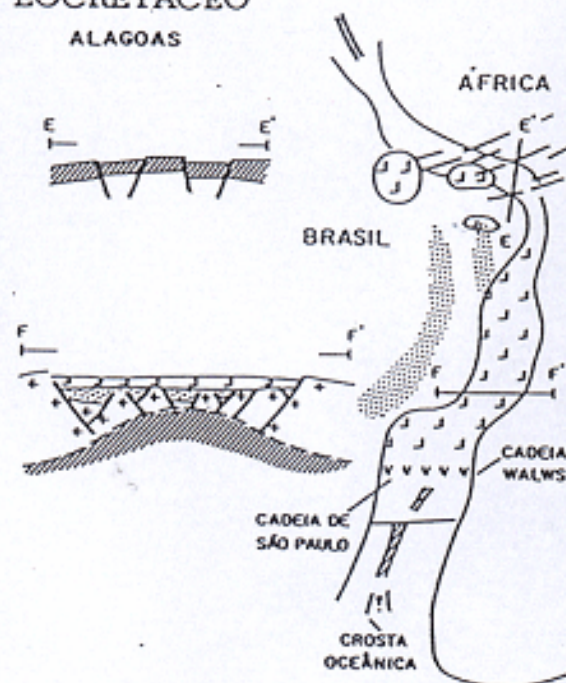
- des pipes de Kimberlites diamantifères

- des intrusions de Carbonatites

Fig 11

— Estágios iniciais da evolução da margem continental brasileira:
a) Neojurássico: estágio pré-rift
b) Eocretáceo: estágio rift
c) Eocretáceo (Alagoas = Aptiano): estágio proto-ocênico; e
d) Albiano: início do estágio ocênico

EOCRETÁCEO ALAGOAS



- J J - EVAPORITOS DEPOSITADOS EM BACIAS RESTRITAS TIPO GOLFO (DESDE SERGIPE/ALAGOAS A SANTOS) E EM BACIAS RESTRITAS INTERIORES (MARANHÃO, ARARIPE, CEARÁ (?))
- - SEDIMENTOS FLUVIO-LACUSTRINOS (TIPO FMS. MARIZAL E URUCUIA) EM BACIAS PERIFÉRICAS
- == - "RIFTS" INCipientES DO TIPO TRANSCORRENTE RESULTANTES DA DISTENSÃO CRUSTAL NA ÁREA SUL

ALBIANO



- "RIFTS" FISSURAS TRANSCORRENTES RESULTANTES DO MOVIMENTO LATERAL DIVERGENTE ENTRE O BRASIL E A ÁFRICA.
- J J - BACIAS EVAPORÍTICAS APTIANAS.
- == - CADEIA MESOATLÂNTICA.

b. Les trapps basaltiques sud américains

- Vers 140-110 Ma, peu avant l'ouverture de l'Atlantique sud du Crétacé inférieur, passage de la plaque sud-américaine sur un point chaud, remontée fissurale de magmas basiques en deux grands cycles. L'ensemble constitue les trapps recouvrant la majeure partie le bassin du Parana.
- Lors du second cycle magmatique, vers 130-120 Ma, émission de la quasi totalité des épanchements massifs sur 1.200.000 Km², couvrant le sud du Brésil et le nord de l'Uruguay actuels.
- Puissance moyenne de 650 m des trapps du second cycle, avec empilement de plusieurs dizaines de coulées, d'épaisseur unitaire de 10 à 60 m, restées horizontales.
- Composition : basalte et parfois termes plus acides, notamment dacites en partie supérieure de certaines coulées.
- Mise en place sur une période de 2 à 3 Ma
- Alternance des épisodes d'épanchements laviques avec des épisodes de sédimentation détritique, qui ont formé des interlits de sables éoliens d'épaisseur métrique.

c. la formation des géodes siliceuses

- Libération des gaz dissous par la chute de pression lors de l'épanchement des laves : selon la viscosité et l'épaisseur du magma, ils parviennent à s'échapper ou s'accumulent en grandes bulles qui deviendront plus tard des géodes.
- Lors du refroidissement de la coulée après solidification , percolation des solutions riches en silice dissoute au travers de la roche vers les cavités de dégazage : précipitation de la silice, sous forme d'agate, de quartz et de zéolites vers 50° C .

d. l'origine des cristaux

- Selon l'acceptation la plus largement admise, la silice dissoute provient des épanchements laviques.
- Malgré une faible teneur initiale moyenne en silice des laves, le processus de différenciation magmatique aurait permis un enrichissement des jus résiduels en silice, suffisant pour générer plus tard les géodes siliceuses.
- Qu'en est-il de la calcite et du gypse, dont les géodes contiennent parfois des cristaux de grande taille ? Ils sont probablement d'origine sédimentaire, après remontée des ions Ca^{2+} , CO_3^{2-} et SO_4^{2-} par des solutions hydrothermales.
- Ces sédiments peuvent être originaires des sables du désert du Botucatu (200 m d'épaisseur), antérieurs aux trapps, situés aujourd'hui en dessous de ces derniers (et peut-être aussi originaires des sables éoliens des interlits formés entre chaque épanchement ?).

e. Le scénario proposé par le Pr Hartmann

- Le Pr L.A. Hartmann est géologue brésilien de l'Université Fédérale de Porto Alegre et membre de l'Académie Brésilienne des Sciences.
- Pour lui, la silice des géodes serait d'origine exogène : elle aurait été apportée par des remontées hydrothermales issues des sables profonds du désert de Botucatu, ainsi que des interlits de sables éoliens formés plus tard..

Résumé du scénario

- formation arénique et aquifère antérieure aux trapps (désert du Botucatu et aquifère du Guarani)
- épanchement des trapps avec piégeage et surpression de l'eau des grès sous jacents
- remontée de fluides hydrothermaux conduisant à une altération et une argilisation de certaines couches de basalte traversées
- ouverture de cavités par ces fluides, suivie d'une précipitation de cristaux lors du refroidissement

séquence proposée par le Pr Hartmann

- Extrusion de laves générée à 1200 ° C
- Refroidissement des laves en basalte à 150 ° C, avec apparition de fissures dans les niveaux d'épanchement les plus minces (puissance inférieure à 35 m).
- Echauffement de l'aquifère sous-jacent du Guarani provoqué par l'épisode volcanique
- Remontée d'eaux, et éventuellement de sables, de l'aquifère, à la fin du cycle de chaque épanchement
- Altération par l'eau chaude des épanchements minces, avec transformation des pyroxènes en smectites
- Ouverture de cavités dans les parties argilisées ramollies de la roche, par la vapeur d'eau sous pression
- Altération des sables remontés en grès agatisés
- Vers 50 ° C, dépôt des minéraux dans les cavités
- Processus d'érosion générale jusqu'à aujourd'hui, laissant en relief les collines dans les zones minéralisées, dont les toits sont fortement silicifiés

C- Exploitation minière

- Gisement d'Ametista do Sul : 16500 ha
- Coopérative : environ 2000 garimpeiros actifs, répartis sur 250 garimpos dans 8 « municipes » (communes)
- Production (base 2007) : 400 T / mois, tous minéraux confondus (améthystes, calcite, gypse, agates...)
- Réserves estimées à 40-50 ans dans les zones déjà inventoriées

L'organisation de l'exploitation minière

- Le garimpeiro (exploitant) doit déposer son permis 3 ans au plus tard après avoir apporté la preuve de l'existence des améthystes, donc après avoir commencé la mise en exploitation de son garimpo.
- La coopérative est propriétaire de l'ensemble des droits miniers, après avoir obtenu de l'Etat une concession de 50 ans.
- Elle délivre des permis d'exploitation à chaque garimpeiro et lui sous-concède les droits miniers de son garimpo, moyennant une redevance établie sur une base mensuelle.
- Pour bien verrouiller le système, la coopérative a créé une JV avec la compagnie d'électricité locale, ce qui lui permet d'inclure la redevance minière dans les factures d'électricité mensuelles des garimpeiros.
- Situation variable pour chaque garimpeiro selon qu'il est propriétaire ou non du terrain, mais on finit toujours par s'arranger ... (le « jeitinho »!)

Commercialisation des améthystes



- La production d'Ametista do Sul est écoulée à 80% vers l'Asie (surtout en Inde) et, pour les 20% restant, essentiellement vers l'Europe.
- L'améthyste est souvent transformée en citrine par chauffage dans des fours à 400-500°C.
- Le prix de vente moyen des améthystes brutes aux clients particuliers était, en avril 2008, de 4 à 5 Reals / kg (2.3 à 2.8 \$/kg au taux de change de l'époque).

Les revendeurs et tailleurs d'améthystes

- Les revendeurs de géodes brutes sont surtout présents plus au sud, à Soledad. Ils ne vendent pas seulement des géodes d'Ametista, mais également des géodes des gisements uruguayens d'Artigas.
- Lajeado, encore plus au sud (120 Km de Porto Alegre) est réputée pour ses trieurs et tailleurs d'améthystes (polissage grossier et taille en cabochon).
- Les prix de vente après taille sont de l'ordre de 12 Reals/ Kg (7 \$/Kg).



Carte Lexilogos Brésil

Un atelier de triage d'améthystes



- Ici, chez Aldémio Constantin, à Lajeado, un artisan en train de trier un tas de citrine.
- Le classement se fait par classes de granulométrie et, pour chacune, en trois degrés de qualité, selon l'éclat et la profondeur de la couleur.
- Le travail, très fatigant, demande des interruptions fréquentes.
- Dans cet atelier de tri, on travaille sur des améthystes, des citrines, mais aussi sur des quartz vert pâle, assez rares, visibles en bout de table.

III- Mines de fer de Vale à Itabira

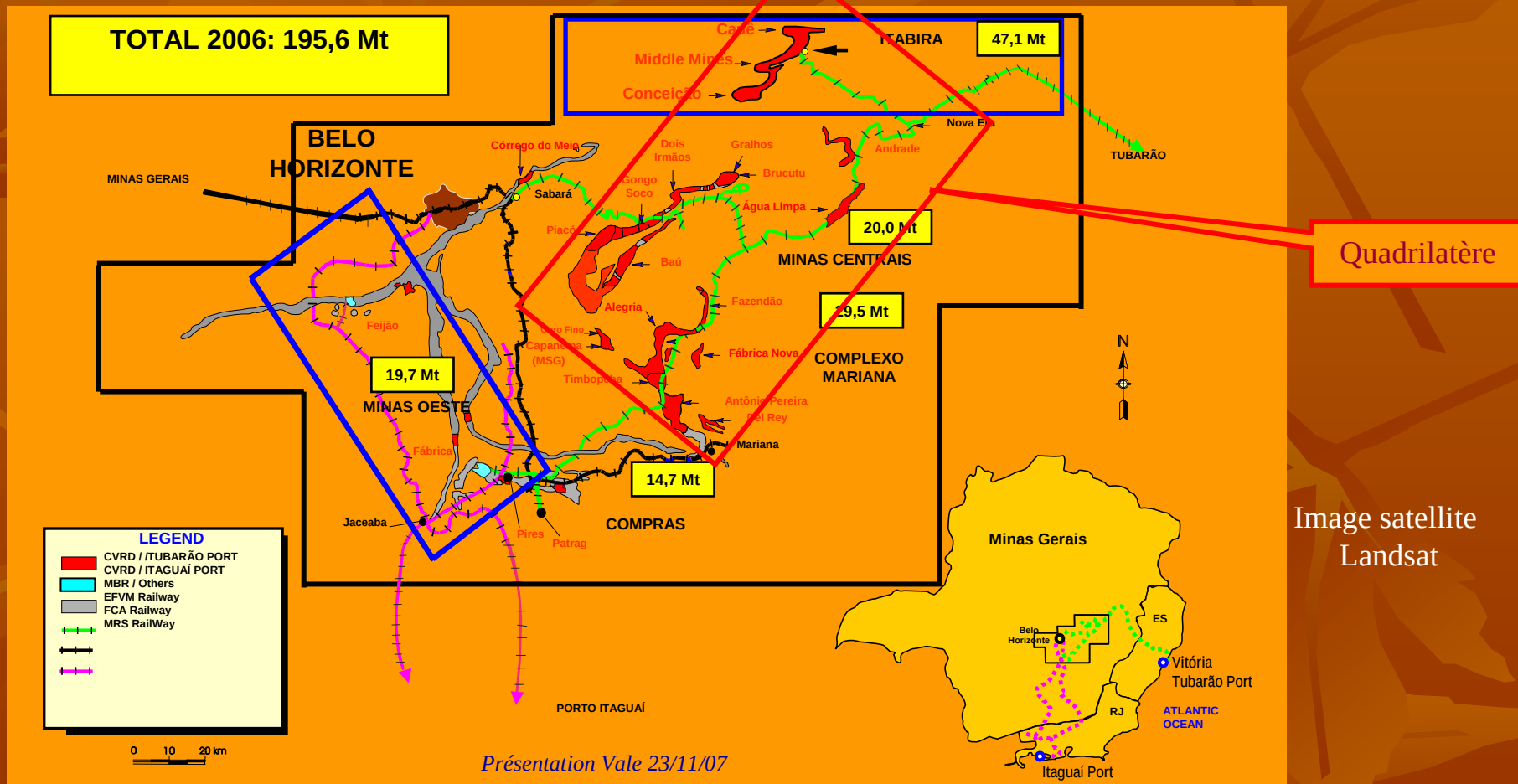


Mines de fer
D'Itabira

Mines de fer d'Itabira - Introduction

- Les mines de fer de Vale, dans la région d'Itabira appartiennent aux grandes formations du quadrilatère ferrifère du Minas Gerais
- Itabira a donné son nom aux itabirites, minerais de fer constitutifs des « BIF » (*Band Iron Formations*) de cette région.
- Vale, anciennement CVRD (Companhia Vale do Rio Doce), est devenue en quelques décennies le producteur de fer quasi exclusif du Minas Gerais et du Brésil.
- Les mines de fer décrites ici sont celles d'Itabira, lieu de fondation de la société, dont elles constituent encore l'essentiel de la production.

Le quadrilatère ferrifère du Minas Gerais



A- Géologie- minéralisations

1. Typologie – L'itabirite

- Rappel sur le fer : 60% de la masse de la terre et 4,2% de la masse de la lithosphère.
- 90 % de la production mondiale issue de formations ferrifères « **Banded Iron Formations** » (**BIF**) ».
- BIF : roches sédimentaires stratifiées, avec alternance de lits siliceux, de cherts et de lits d'oxydes de fer (hématite et magnétite) et parfois de carbonates et silicates de fer.
- Ce minerai de fer est connu sous le nom de **Taconite** aux Etats Unis et au Canada (formations du Lac supérieur), de **Jaspilite** en Australie et d'**Itabirite** au Brésil

2. Typologie des minerais d'Itabira

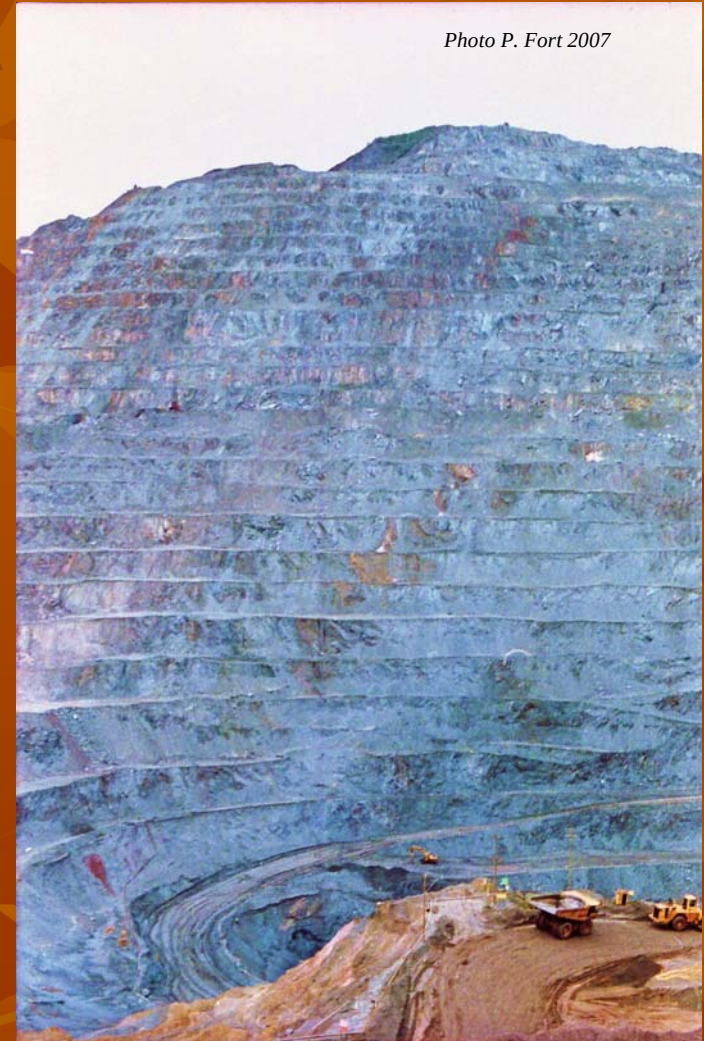
- Les minerais d'Itabira s'étagent sur une séquence de plusieurs centaines de mètres de profondeur.
- Ci-après, coupe schématique d'un gisement typique :



(Mine de
Conceição)

Séquence schématique des couches minéralisées

- la « *canga* » (cuirasse de limonite)
- En surface, peu exploitée, en raison de sa haute teneur en phosphore
- l' *itabirite syntectonique*
Passages d'hématite massive sous forme rocheuse (67% de teneur en fer), alternant avec passages de silice, et parfois recristallisation de l'hématite en magnétite (mine de *Perequito*)
- l' *hématite « molle »*
Très exploitée car facile à extraire (sans explosifs), bonne teneur en fer (55%)
- l' *itabirite massive* au fond
Quartzites hématitiques rubanées, roche dure difficile à exploiter, teneur en fer moyenne (45%).

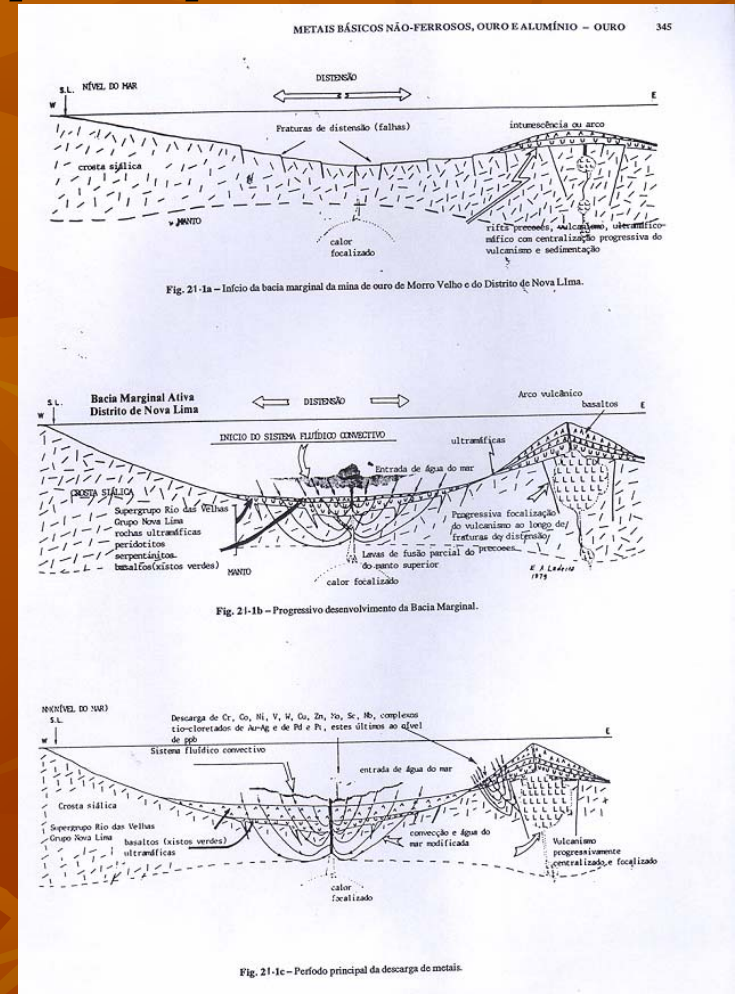


B- Contexte géologique des itabirites

a. le « quadrilatère ferrifère »

- 1. Formations archéennes du *super groupe de Rio das Velhas*
- Dépôt dans un sillon de type *Green Stone Belt* (2,8 Ga)
- Séries sédimentaires et ferrifères (BIF) en association avec roches ultrabasiques et basaltes

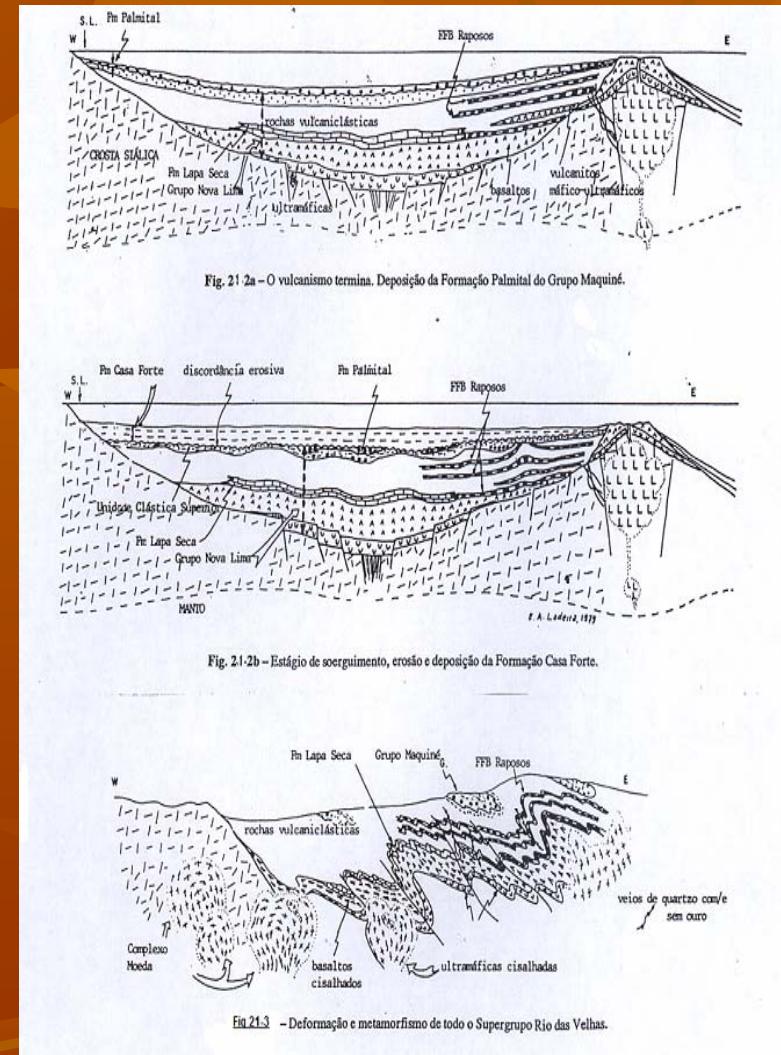
Source : Departamento nacional da produção mineral do Brasil - Principais Depósitos Minerais do Brasil, Vol. II, III, IV 1986, 1988, 1989



a. le « quadrilatère ferrifère » (suite)

- 1. Formations archéennes du **super groupe de Rio das Velhas**
- Phase **Jéquié-Aroense** (2,6 Ga) : plissement et métamorphisation

Source : Departamento nacional da produção mineral do Brasil - Principais Depósitos Minerais do Brasil, Vol. II, III, IV 1986, 1988, 1989



a. le « quadrilatère ferrifère » (suite)

Source : Departamento nacional da produção mineral do Brasil - Principais Depósitos Minerais do Brasil, Vol. II, III, IV 1986, 1988, 1989

- 2. Formation d'*Itabira*
 - partie de la formation du *super Groupe Minas*
 - déposée entre 2,6 et 1,9 Ga
 - encadrée par deux formations détritiques quartziteuses (*Caraça* et *Piracicaba*)

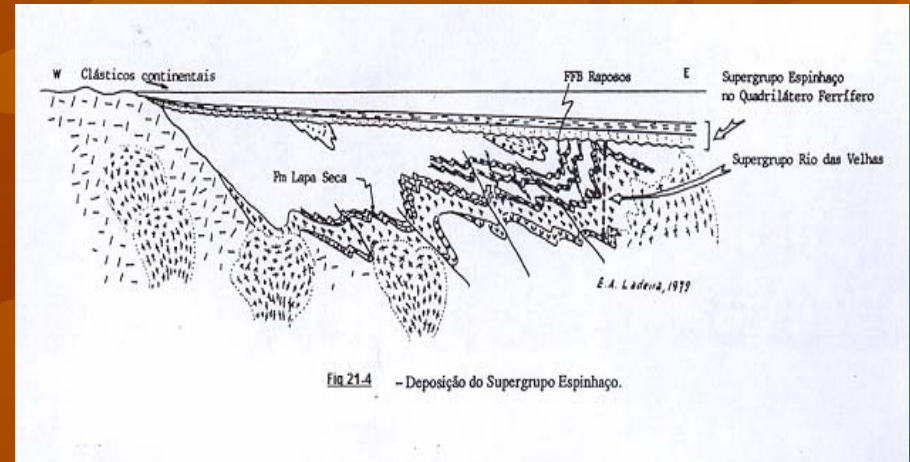


Fig. 21-4 - Deposição do Supergroupo Espinhaço.

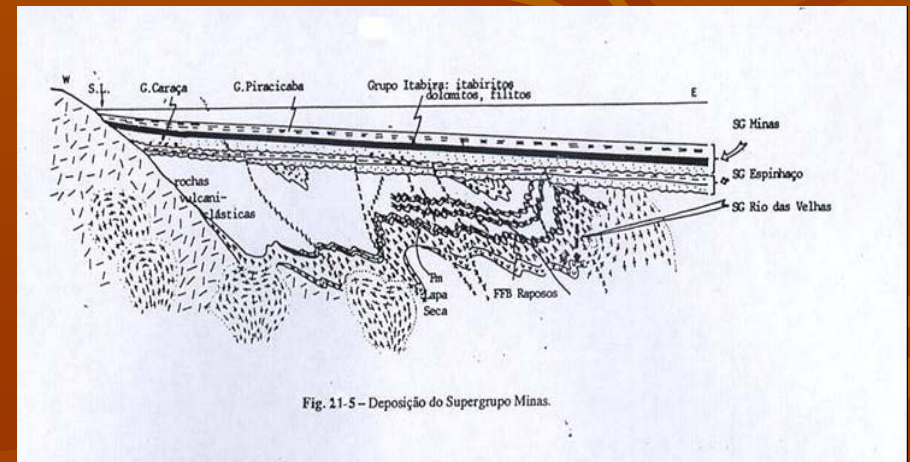


Fig. 11-5 - Deposição do Supergroupo Minas.

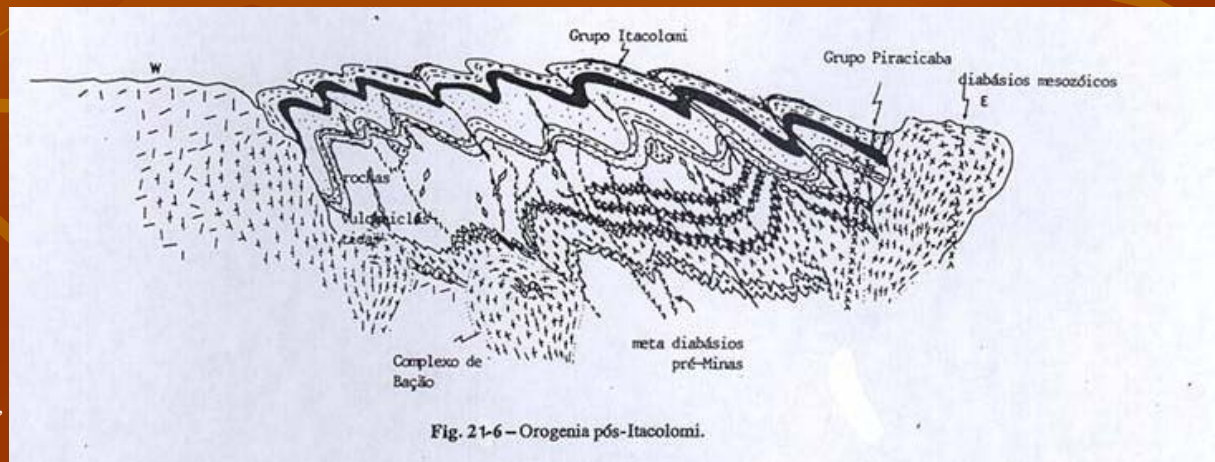
a. le « quadrilatère ferrifère » (fin)

■ 2. Formation d'*Itabira*

- Remaniements successifs du craton et des 2 super groupes, lors des autres phases tectono-métamorphiques :
(1,9 Ga *Transamazonienne* , 1,1 Ga *Espinhaço* , 570 Ma *Brasiliano*)

Structures très complexes :

Gisements exploités situés dans une synforme, localisée dans le flanc inverse d'une nappe de charriage, elle même redéformée !



Source : Departamento
national da produção
mineral do Brasil -
Principais Depósitos
Minerais do Brasil, Vol. II,
III, IV 1986, 1988, 1989

b. Formation des Itabirites

1. L'origine des dépôts de fer : deux hypothèses

soit à partir du craton :

- ionisation des roches granitiques et métamorphiques
- plateau continental faiblement immergé
- milieu fortement réducteur
- complexation des ions ferreux en ions ferriques

soit à partir du manteau:

- magmatisme et hydrothermalisme
- structures « *green stone belt* » ou « *bordure de plaque continentale* »
- Remontée oxydes de fer, silice via fractures jusqu'au fond marin
- Concentration silice colloïdale et $\text{Fe}(\text{OH})_3$

Source : Departamento nacional da produção mineral do Brasil - Principais Depósitos Minerais do Brasil, Vol. II, III, IV 1986, 1988, 1989

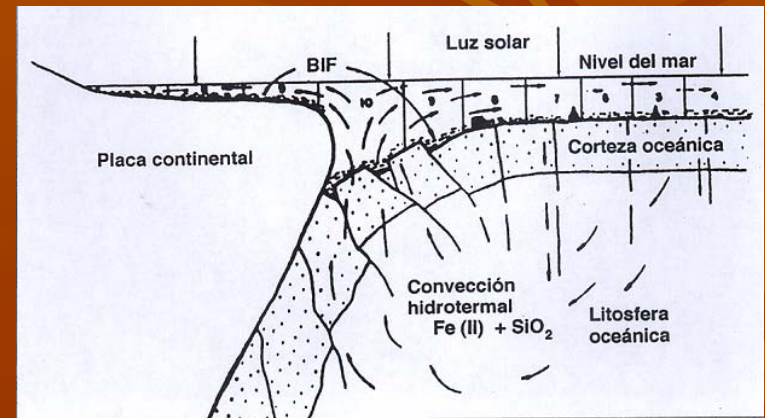


Figure 20 Genèse des formations de fer de type BIF sous la plaque océanique et la marge continentale (3)

b. Formation des Itabirites

2. La mise en place des itabirites

- Photo oxydation du fer (atmosphère pauvre en oxygène + rayonnement UV)
- Précipitation du fer sur des lits d'algues
- Venues périodiques de particules clastiques (galets, sables, silts)
- Précipitation des itabirites au rythme d'une paire de couches (une de fer, une de silice) :
 - Dépôts de fer d'origine biochimique
 - Dépôts de silice d'origine détritique ou colloïdale, parfois substitués par de l'argile

b. Formation des Itabirites

3. L'évolution des itabirites

■ **Déformations et métamorphisme**

- Accumulation du fer dans les têtes des plis structuraux
- transformation de la silice en quartzites, des argiles en micas
- diagenèse par élimination de l'eau : transformation de la silice en cherts, des hydroxydes de fer en oxydes
- transformation de l'hématite en magnétite

■ **Intrusions plutoniques**

- métasomatose hydrothermale de la silice par de l'hématite
- mise en place d'or (minéralisations *Jacotinga*)

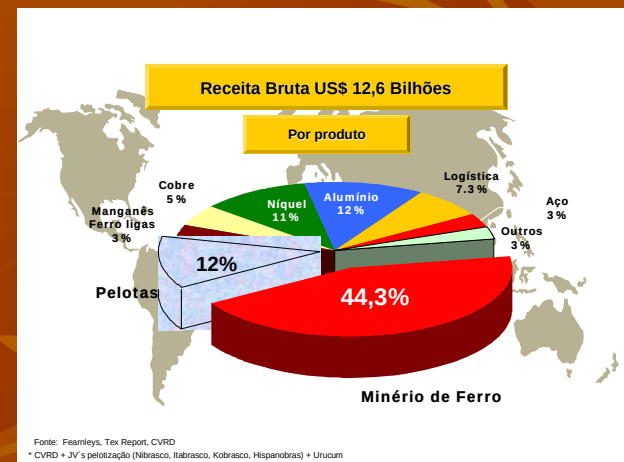
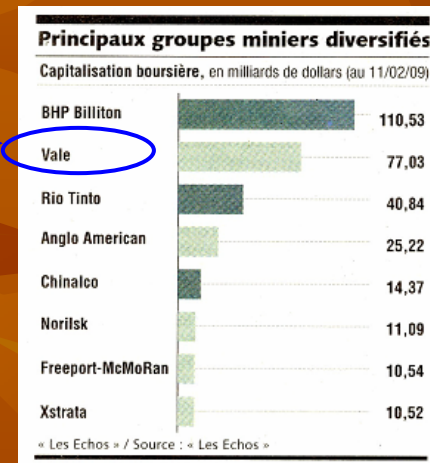
■ **Altération des gisements**

- Lessivage pluies tropicales, altération en surface
- ***Canga***, conglomérat d'itabirite et d'hématite, ciment limonite
- Dissolution du quartz des cherts, substitution par goethite ou limonite

C- Production et commercialisation

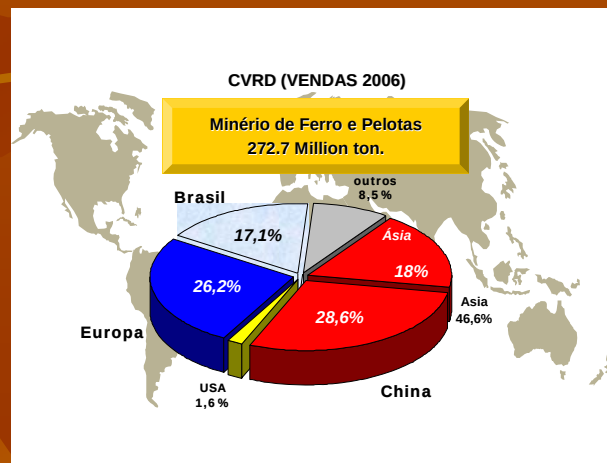
1. Le groupe Vale

- Position clef mondiale dans la production minière des grands minéraux :
(fer, manganèse, nickel, cuivre, aluminium, kaolin, potasse, or...)
- Position considérablement renforcée sur le nickel après le rachat d'Inco (s'ajoutant aux mines existantes dans l'Etat de Para (Ni, Cu, Au),.



Le fer chez Vale

- Le fer représente 44% des recettes de Vale (en réalité 56 % si l'on y inclut les *pelotas* (« fines »))
- L'Asie absorbe 47% des débouchés, dont 29% en Chine (La production de la Chine est constituée de minerais de basse qualité).



Présentation Vale 23/11/07

Mines de fer de Vale au Brésil

Perfil da área de MF na CVRD



Présentation Vale 23/11/07

Vale avait prévu de démarrer deux autres projets miniers géants sur des Itabirites (dont le plus important dans l'état de Bahia). Qu'en sera-t-il aujourd'hui avec la baisse des cours du fer ?

Sistema Norte:

Produção: 81.7 Mt/ano

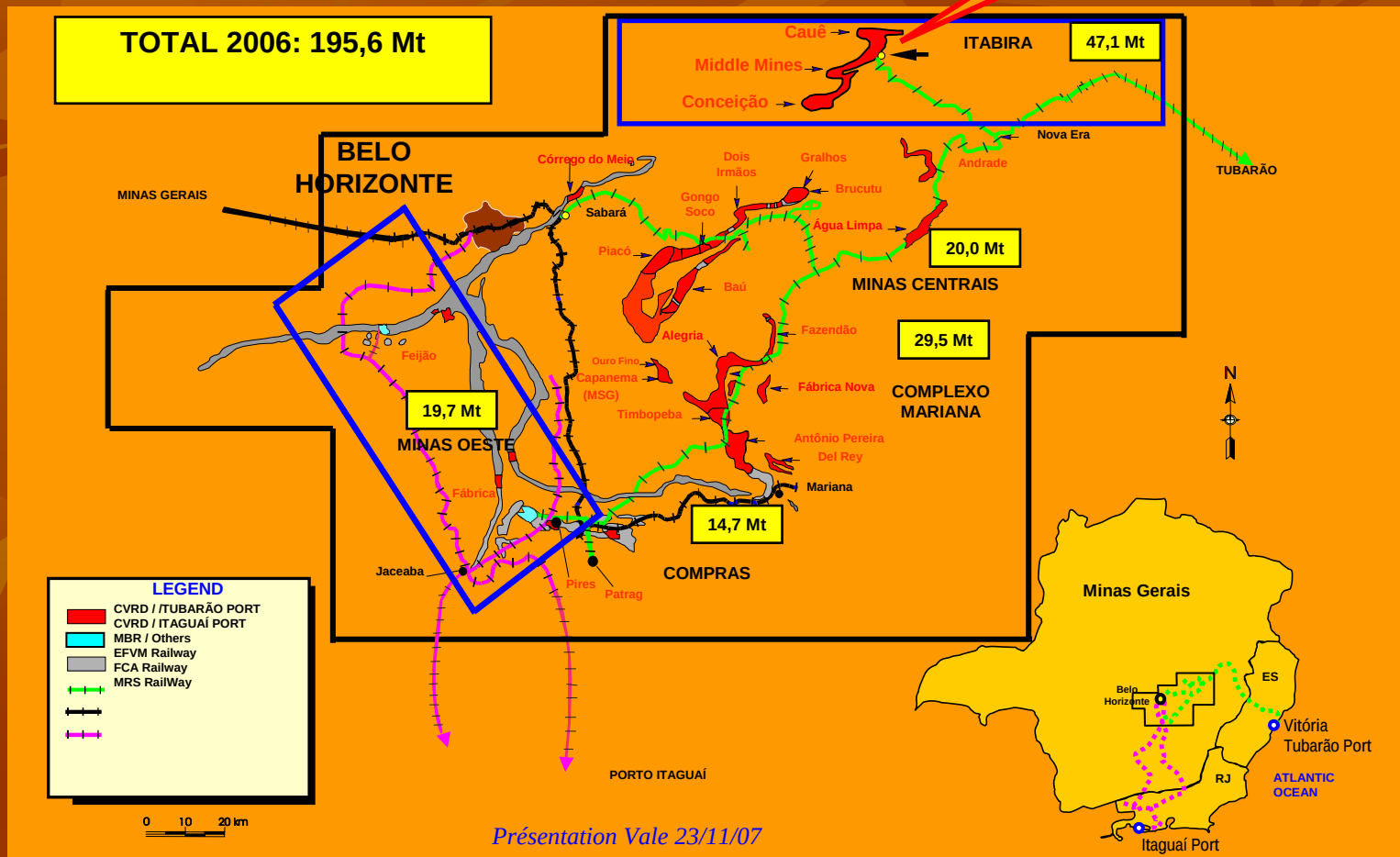
Sistema Sul:

Produção: 84.3 Mt/ano

Sistema Sudeste:

Produção: 96.6 Mt/ano

Minerai de fer de Vale dans le Minas gerais



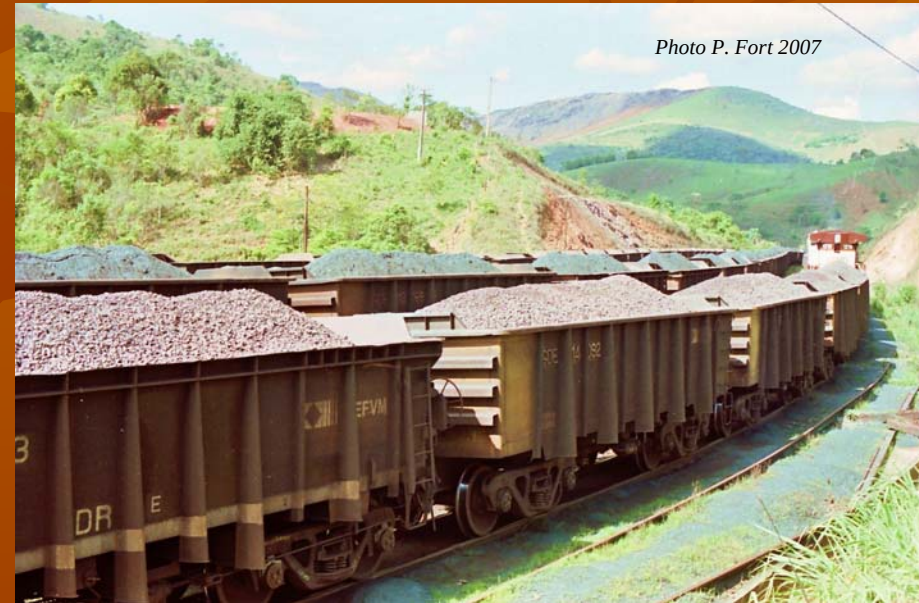
Axes stratégiques de Vale

- Contrôle de la logistique et des utilités :

Au Brésil, détention en propre de ports en eau profonde (Vitoria, Sao Luiz...), de voies ferrées (900 Km), d'énormes capacités de transport maritime, d'un barrage hydroélectrique, d'un pipeline pour le transport de boues liquides de fer (pulpes)...

- Attention portée à l'environnement.

Anticipation sur la réglementation brésilienne. (Vale a été récemment à l'origine de réglementations contraignantes)



Stratégie logistique et environnementale, qui a permis à Vale d'éliminer ou de racheter ses concurrents au cours de la dernière décennie dans le Minas Gerais, alors qu'au départ elle ne contrôlait « que » 30% du quadrilatère de fer...

2. L'exploitation des mines d'Itabira

La zone d'Itabira comprend 7 mines (en jaune sur la carte), exploitées à ciel ouvert, sur une surface ellipsoïdale d'un grand axe d'environ 15 Km !



6 mines de fer d'Itabira en activité :

Chacrinha, Camarinha, Onça, Dois Corregos, Perequito, Conceição



Présentation Vale 23/11/07

- Durée de vie des réserves prouvées de 20 ans, des réserves possibles de 50 ans
- Production : 168 MT en 2007 (hors quote-part société MBR)
- Il y a 10 ans, l'itabirite, de basse teneur (45 à 47 %), était encore traitée en stérile. On n'exploitait que l'hématite « pure », à teneur en fer de 65%, très proche de la teneur stoechiométrique de 69% du Fe_2O_3 .
- A la suite de la montée des cours mondiaux du fer lors de la dernière décennie, l'itabirite est devenue le minerai le plus abondant. Le restera-t-elle ?

La mine de Cauê

- La mine de Cauê (la plus proche d'Itabira) fut le berceau de l'activité de Vale
- Maintenant fermée, utilisée pour stocker les stériles et les boues des autres mines en activité



Les engins mécanisés

Quelques données, sur la base de la production de 2007 (168 MT)...

- dumpers

- 68 engins
- 145 lt /h gazole par engin
- capacité par engin de 136 T à 220T
- coût d'un pneu : 28000 \$
- empattement de 8 m, à comparer à 30 m de largeur des pistes
- sur chaque engin, système contrôle pesée au chargement, sécurité automatique par arrêt moteur

- pelles

- godets de 14 à 34 M3 de capacité

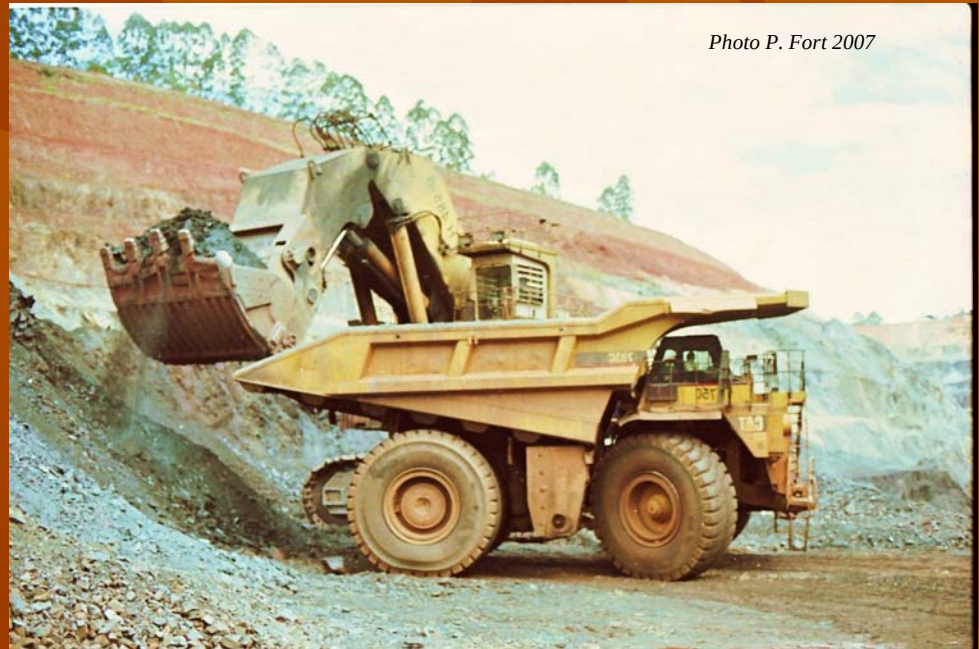


Photo P. Fort 2007

Usine de traitement d'Itabira (Cauê)

Deux étapes principales dans le processus :

- Concassage d'un mélange d'itabirite (50% fer / 20% silice) et d'hématite (65% fer / 4% silice)
- Tri des hématites massives (transférées directement au parc d'expédition des minerais)
- Production d'un minerai composite à 54% de fer
- Flottation du minerai composite, séparant le minerai commercial (67% fer / 3% silice) du stérile (24% fer / 48% silice)
(*procédé de flottation « inverse » qui consiste à flotter le stérile siliceux*).

IV- Mine d'émeraudes de Canaa



Mine d'émeraudes
de Canaa

Mine d'émeraudes de Canaa-introduction

- Le Brésil comprend différents gîtes d'émeraudes, situés essentiellement dans les 4 Etats adjacents de *Bahia*, *Tocatins*, *Goias* et *Minas Gerais*.
- La mine de *Canaa* fait partie des gîtes d'émeraudes du quadrilatère ferrière du Minas Gerais.
- Elle est située à 20 Km d'*Itabira*, entre les mines de *Belmont* et de *Capoeirama*.
- Les émeraudes de *Canaa* sont à dominante vanadifère.



Geoatlas – Copyright 1998

A- Gitologie-minéralisations

1. Typologie

- Exploitations anciennes d'aigues marines et d'alexandrites à proximité du site.
- Gisement situé dans des schistes à phlogopites.
- Puissance des zones fertiles pouvant aller jusqu'à 10m.

Observation des couches en place

Coupe schématique
stratigraphique
(de haut en bas)

- Granites
- Amphibolites
- Schistes à phlogopites fertiles entrecoupés de quartzites
- Gneiss à grenats



Observation des couches en place

- Des lentilles et rubans de quartzite sont insérés dans les schistes.
- Les émeraudes sont localisées aussi bien dans les quartzites que dans les phlogopites.

Phlogopites

Amphibolites



2. Description des émeraudes

- Émeraudes à dominante vanadifère.
(couleur plus claire que les émeraudes de Belmont, à dominante chromifère).
- Présentation sous forme de petits prismes (section infra centimétrique), souvent allongés (jusqu'à 10 cm).



B- Contexte géologique des émeraudes

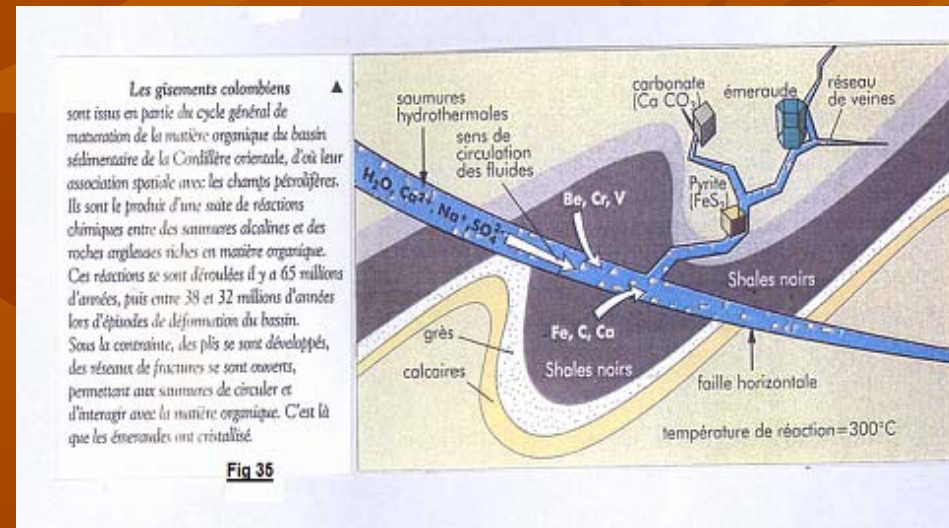
a. Rappels sur les émeraudes

- **Béryl** : silicate d'aluminium et de béryllium ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$)
 - Minéral accessoire des roches granitiques
 - Pegmatites à éléments rares (Li, Nb, Ta, Be, Sn)
- **Émeraude** : béryl couleur verte : traces de chrome et de vanadium
 - Substitution de Al^{3+} par Cr^{3+} , V^{3+} et Fe^{3+}
- **Minéral rare** : origine différente des éléments constitutifs :
 - béryllium (roches granitiques et alcalines intrusives d'origine croûte continentale)
 - chrome et vanadium (soit roches mafiques ou ultramafiques d'origine mantellique, soit roches sédimentaires)

b. Types de gisements d'émeraudes

Gisements de type colombien

- gîtes chromifères
- chrome dans séries sédimentaires
- lessivage par saumures hydrothermales
- gemmes recherchées : couleur vert profond et limpidité des prismes



Source : A. Cheilletz, P. Gillet : Comment se forment les émeraudes, La Recherche no 271, Déc 1994

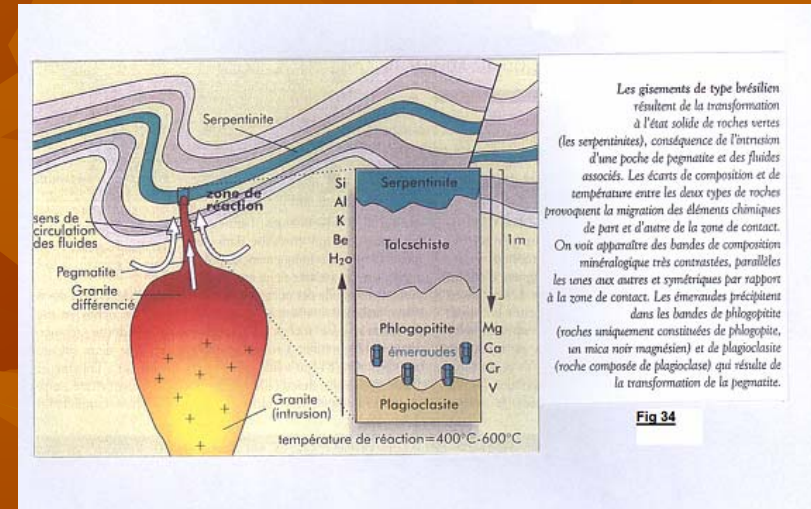
Gisements de type brésilien

- gîtes vanadifères et chromifères
- chrome et vanadium dans roches mantelliques

c. Genèses des gisements brésiliens

Genèse la plus fréquente

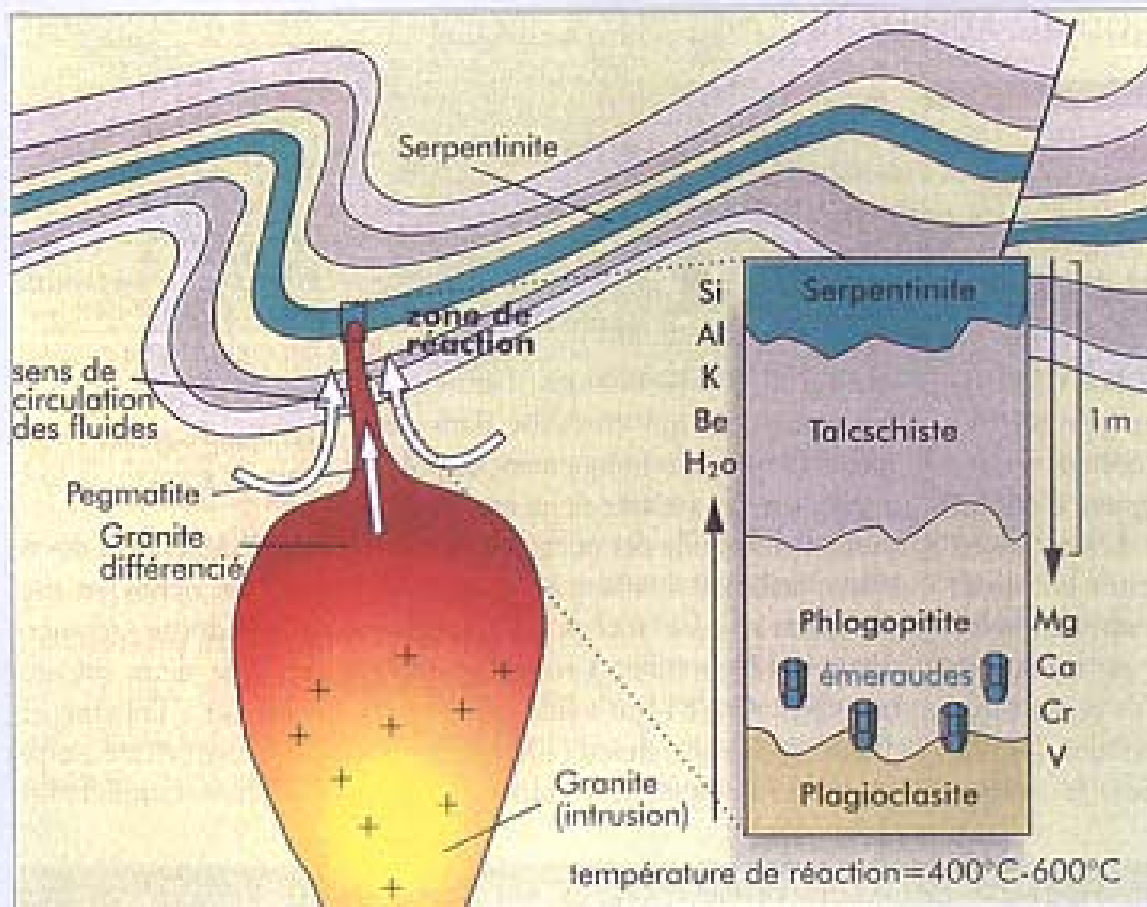
- Emeraudes dans schistes à phlogopite (mica noir riche en Fe et Mg)
- **Genèse de la phlogopite fertile :**
 - transformation des roches mantelliques basiques (péridotites, serpentinites gabbros) et de leurs transformés métamorphiques (amphibolites, pyroxénites)
 - sous l'effet d'un fluide chaud alcalin (400 à 600° C), riche en Be, d'origine magmatique intrusive granitique



Source : A. Cheilletz, P. Gillet : Comment se forment les émeraude, La Recherche no 271, Déc 1994

Autre genèse brésilienne : gisements de Santa Terezina, Belmont (et Canaa ?)

- pas d'origine intrusive granitique ou pegmatitique directe
- mais cisaillements ductiles de la croûte continentale
- circulation de fluides alcalins HT recoupant des *green stones belts* mantelliques

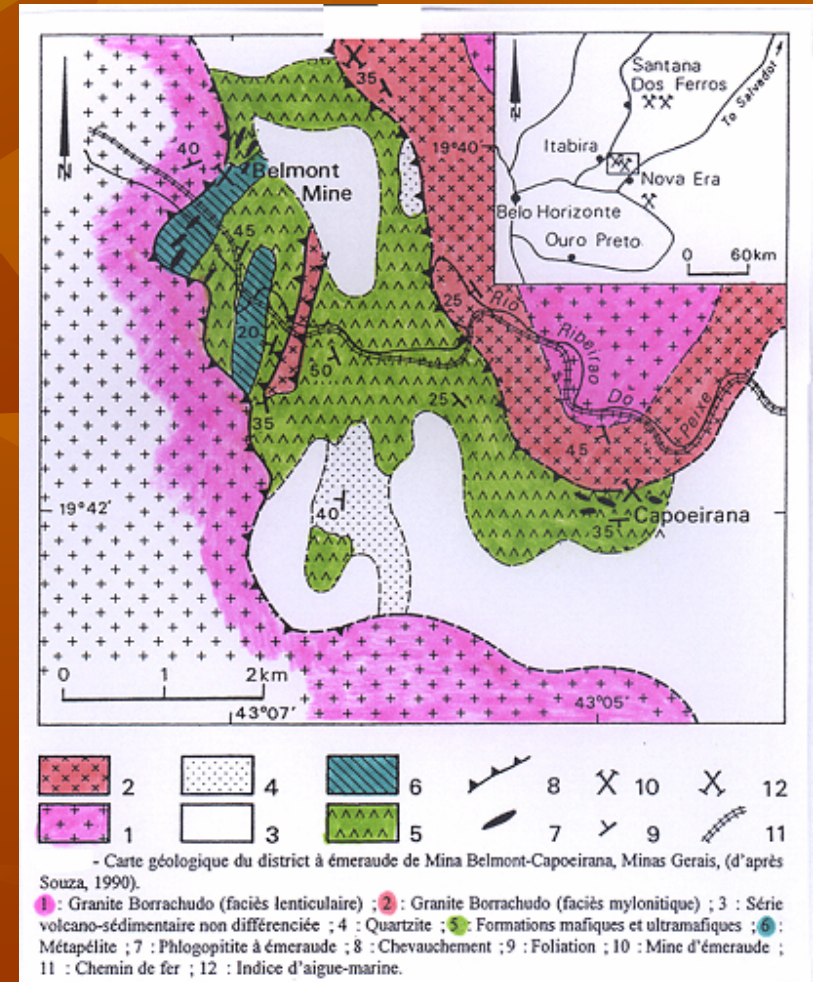


Les gisements de type brésilien résultent de la transformation à l'état solide de roches vertes (les serpentinites), conséquence de l'intrusion d'une poche de pegmatite et des fluides associés. Les écarts de composition et de température entre les deux types de roches provoquent la migration des éléments chimiques de part et d'autre de la zone de contact. On voit apparaître des bandes de composition minéralogique très contrastées, parallèles les unes aux autres et symétriques par rapport à la zone de contact. Les émeraudes précipitent dans les bandes de phlogopitite (roches uniquement constituées de phlogopite, un mica noir magnésien) et de plagioclase (roche composée de plagioclase) qui résulte de la transformation de la pegmatite.

Fig 34

d. Gisements de Belmont et de Capoeirama

- Gisement au contact entre granite (**Borrachudo**) et série volcano-sédimentaire
Formations supracrustales du **super groupe Minas**.
- Série volcano-sédimentaire : métapélites (schistes à micas, grenats, staurotides), roches ultrabasiques (schistes à talc, chlorite, trémolite), quartzites et tufs.
- Granite de **Borrachudo** du socle Archéen :
 - mylonitisé et métasomatisé au Protérozoïque
 - filons de quartz
 - filons pegmatites (feldspaths, béryls aigue marine) concentrés dans zone de contact entre gneiss et formations supracrustales
- Formation des émeraudes :
 - par circulation des fluides pegmatitiques
 - concentrée dans les phlogopites issues de la transformation des talc schistes



Source : G. Guiliari : Les gisements d'émeraudes du Brésil, Chronique de la Recherche Minière, no 526, 1997

C- Exploitation minière

Historique

- Le terrain de Canaa appartenait au propriétaire de Belmont, qui l'a cédé à l'un de ses associés, sans l'avoir prospecté.
- Suite au résultat des sondages (taux positif excellent de 17%), création de la société minière « Rochas Mineração ».
- Permis d'exploitation en cours d'obtention (depuis début 2007...).
- Bâtiments centraux (bureaux, usine de cribles, hangar de tri ...) financés par la vente des émeraudes extraites dans le cadre du permis de recherche.



Photo L.F. Souza Ribeiro 2007



Photo L.F. Souza Ribeiro 2007

La production minière

- Production « prospective » (permis d'exploitation pas encore octroyé...)
- Démarrage dans les zones les plus riches, en souterrain, par exploitation en chambres et piliers
- Réserves prouvées estimées à 60 ans
- Production prévue de 30 kT/an de schistes
- Extraction en découverte après épuisement des filons souterrains
- Ratio de découverte de 20 (20 vol. stérile pour 1 vol. minéral)

La gestion de l'eau

- Défi majeur de l'exploitation future
- Besoins bruts en eau élevés (150 m³/h) (pour désagréger le minéral altéré très argileux)
- Exploitation conçue pour fonctionner en circuit fermé.
- Besoins nets après recyclage de 600 litres/h pour être en conformité avec la réglementation locale
- D'où nécessité d'un gros barrage de rétention : en construction en flanc de colline
- Ce n'est pas gagné...

Le traitement des émeraudes

- La production sera acheminée par bande transporteuse jusqu'à l'usine.
- Cette usine comprend :
 - une trémie d'entrée débouchant sur un concasseur et un crible laveur
 - trois trémies à granulométrie différente alimentant la salle de tri
- Les pierres arrêtées dans les trémies sont recyclées dans le concasseur



La salle de tri

- 3 bandes de tri pour chaque tranche de granulométrie (variant entre 3 et 21mm)
- Changement fréquent de bande par les employés, pour limiter la fatigue des yeux,
- Système de tri optique prévu, dérivé d'une machine de tri des ordures ménagères (expérimentation positive par Belmont).



D - Commercialisation

- Teneur moyenne en émeraudes (toutes qualités) des minerais déjà extraits : 120 g/T à comparer à 30 g/T pour Belmont.
- Jusqu'à 600 g/T dans certains passages.
- 22% des gemmes sont lapidables
- 2 grosses pierres ont été extraites d'une gangue kaolinisée : 2 à 3 Kg !
- 2 pierres de 40 g chacune, de qualité colombienne (chromifère) : vendues 40 000 \$!