

# GÉODYNAMIQUE DU CRATON DU SÃO FRANCISCO – RESSOURCES MINÉRALES – SYSTÈME D'INFORMATION GÉORÉFÉRENCÉ (SIG-BAHIA)

Convention CNPq/IRD

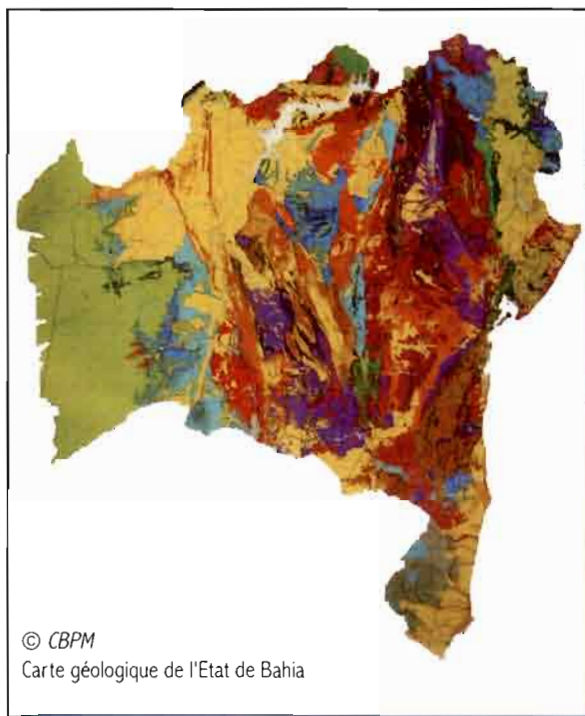
IRD/UR104 – Pierre Sabaté

IGEO-UFBA – Jöhildo S. Barbosa

**IRD** : Gérard Cochonneau

**IGEO-UFBA** : Herbet Conceição, Manoel-Jerônimo M. Cruz, Ângela B.M. Leal, Moacyr M. Marinho, Hosanira S. do Nascimento

**Autres partenaires** : Hervé Martin (Univ. Blaise Pascal), Jean-Jacques Peucat, Renaud Caby (CNRS), Jean-Pierre Milési, Patrick Ledru (BRGM), Jean-Luc Bouchez (UPS), José-Carlos Cunha (CBPM), Léo R. Teixeira, Roberto C. de Melo (SGB/CPRM)



## Accrétion de la croûte continentale de 3,4 à 1,9 Ga et ressources minérales

Le craton du São Francisco est l'une des principales portions de croûte continentale, stable depuis près de 2 milliards d'années (2,0 Ga), formant l'ossature du bouclier brésilien. Ce craton constitue sans doute le

meilleur témoin de l'histoire géologique la plus précoce du continent sud-américain. Il est distribué dans deux aires géographiques. La plus importante occupe la presque totalité de l'Etat de Bahia au nord et un noyau beaucoup plus restreint apparaît dans l'Etat du Minas Gerais au sud. Les travaux réalisés par l'IRD et ses partenaires au Brésil (CNPq-UFBA, CBPM, CPRM) et en France (CNRS, Université, BRGM), au cours de la dernière décennie, concernent la partie nord du Craton. Ils ont permis de dresser la carte géologique de l'Etat de Bahia (figure ci-contre) avec les soutiens et la collaboration étroite de la Companhia Bahiana de Pesquisa Mineral (CBPM), ainsi que de précieuses collaborations des équipes du service géologique du Brésil (SGB/CPRM). Notre objectif a été de reconstituer avec précision, l'évolution géodynamique ayant abouti à la mosaïque des terrains de la carte structurée (Figure 1 – Sabaté et Cunha, 1998). La structure s'articule sur le linéament Contendas-Jacobina. Il s'agit d'un système complexe d'imbrications tectoniques, étiré sur plus de 600 km selon la direction nord-sud, où s'affrontent deux segments continentaux majeurs : le bloc du Gavião à l'ouest et le bloc de Jéquié à l'est. Cette structure représente les racines d'une chaîne de collision d'âge précambrien dont les suprastructures ont pu, à leur échelle, être équivalentes à celles des chaînes de collision modernes comme l'Himalaya.



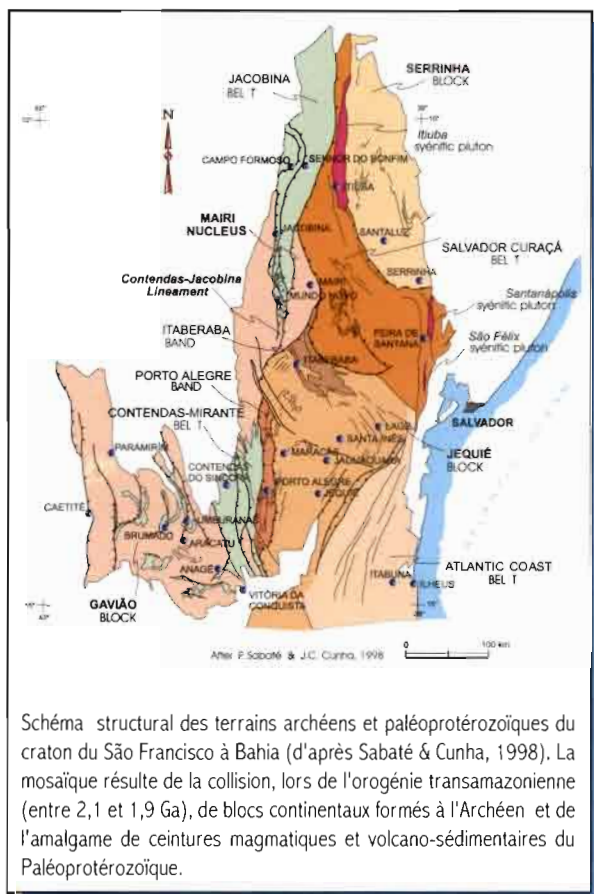


Schéma structural des terrains archéens et paléoprotérozoïques du craton du São Francisco à Bahia (d'après Sabatê & Cunha, 1998). La mosaïque résulte de la collision, lors de l'orogénie transamazonienne (entre 2,1 et 1,9 Ga), de blocs continentaux formés à l'Archéen et de l'amalgame de ceintures magmatiques et volcano-sédimentaires du Paléoprotérozoïque.

Le bloc occidental, le plus ancien, est composite. Il a été construit par une succession d'événements d'accrétion magmatique, bien identifiés et datés de 3,4 Ga à 2,6 Ga (milliards d'année). Il est constitué de gneiss-gris (association de roches plutoniques, à composition de tonalite, trondhjémite et granodiorite = TTG) et de terrains "granite-greenstone" (ceintures de roches vertes communes des temps archéens). La large distribution géographique des TTG, avec des âges de 3,4 Ga à 3,1 Ga, suggère que ces terrains les plus anciens constituaient un véritable proto-continent.

Le second (bloc de Jequié) a été édifié en plusieurs étapes, entre 2,9 Ga et 2,6 Ga et forme, lui aussi, un assez large segment continental, plus jeune et distinct du premier quant à la genèse de ses roches. Il est principalement formé de charnockites/enderbites, ainsi que de termes supracrustaux (sédiments et volcanites), recristallisés dans le faciès granulite. Les assemblages minéraux de toutes les roches indiquent un équilibre dans des conditions profondes  $P \cong 5-6$  kbars,  $T \cong 800-850$  °C. Ce métamorphisme de haut degré est daté de 2,09 Ga.

La convergence des deux proto-continents est responsable :

1. du remplissage des bassins d'avant-chaîne contemporains des processus de collision. Ils constituent maintenant les ceintures orogéniques de Jacobina et Contendas-Mirante. Des âges Ar-Ar d'excellente définition montrent que les incréments de la tectonique de collision sont diachroniques et progressent d'est en ouest de 2,09 Ga à 1,92 Ga, au fur et à mesure de l'évolution du bassin d'avant-chaîne.
2. de la génération de la suite plutonique juvénile Salvador-Curaçá, syn-cinématiques, mise en place à 2,1 Ga dans un environnement du faciès granulite;
3. de l'intrusion, autour de 2,0 Ga, de puissants massifs de syénites, d'origine mantellique, mis en place à la faveur de mécanismes de «pull-apart» le long d'un décrochement sénestre de plus de 800 km de long.
4. de la mise en place à 1,9 Ga de nombreuses intrusions de granites peralumineux, le long du chevauchement Contendas-Jacobina. Ces granites cachètent l'histoire géodynamique de l'orogénie transamazonienne.

Avec le modèle de bassin d'avant-chaîne, s'expliquent de manière plus cohérente les mécanismes de concentration d'or de la ceinture de Jacobina, rendant obsolète le modèle de paléo-placer qui guidait jusqu'alors les prospections et l'exploitation. Plusieurs étapes d'activité hydrothermale extensive, accompagnent et imprègnent les discontinuités tectoniques qui se développent au cours des incréments successifs du processus de collision. Les concentrations



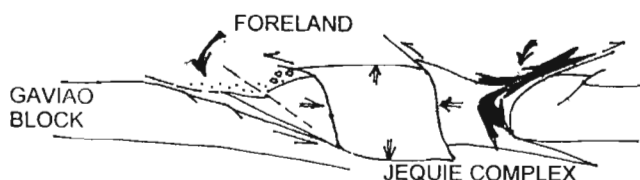
Plages d'or natif dans une veine de quartz recouverts par les formations de quartzites de la ceinture de Jacobina (région de Saude).

économiques ne se limitent pas aux horizons conglomératiques mais suivent les différentes structures de cisaillement et peuvent se retrouver dans toutes autres formations volcano-sédimentaires de la ceinture. Après fermeture des mines de Jacobina en 1998, l'exploitation a repris récemment et prend en considération ce nouveau modèle métallurgique.

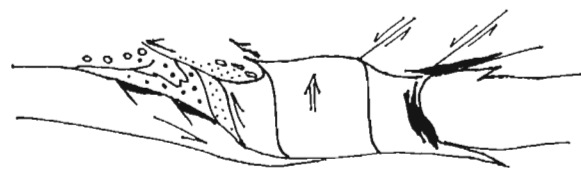
Les études menées fournissent des informations déterminantes sur la genèse des premiers continents du globe et sur les régimes tectoniques responsable de l'amalgamation crustale. L'édification de la croûte continentale de 3,4 à 1,9 Ga est due, pour la plus grande part à de l'accrétion plutonique. Celle-ci s'avère soit juvénile, soit palyngénétique, par recyclage de la croûte déjà formée. Il a été possible de modéliser avec précision la pétrogenèse de plusieurs ensembles plutoniques de ce plus ancien segment du craton du São Francisco. On propose que la production magmatique juvénile à l'Archéen est à rapporter à des mécanismes de subduction et collision, analogues aux mécanismes modernes mais, à l'Archéen, dans un environnement à gradient géothermique élevé qui induit une proportion élevée de fusion partielle directe de protolithes tholéiitiques subductés. Au Paléoprotérozoïque, les termes juvéniles sont proportionnellement moins représentatifs et, pour la plupart, correspondent à des granites calco-alcalins qui paraissent être exclusivement en relation avec des mécanismes transpressifs et/ou transtensifs (*pull-apart*). Pour chaque période, bien qu'en proportion moindre à l'Archéen ancien, les plutons

résultent du recyclage de protolithes antérieurs. Il s'agit de tholéiites et de TTG pour l'Archéen. Pour le Paléoprotérozoïque, si l'on rencontre des TTG parmi les sources, les autres termes crustaux, parmi lesquels les séries volcano-sédimentaires supracrustales prennent une place de plus en plus importante. C'est donc une histoire géologique, d'une des époques les plus lointaines de la formation des continents sur la terre, qui est reconstituée avec la précision des techniques de pointe de mesure des âges isotopiques réalisée à Rennes (CNRS), Clermont-Ferrand (Université-CNRS), à l'USP, ainsi que dans les laboratoires de Canberra (Australie) et du CNRS de Montpellier pour des datations particulières (SHRIMP sur zircon et  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sur micas respectivement). Elle est étayée par des travaux de géochimie et de modélisation des processus pétrogénétiques. La reconstitution des structures et les hypothèses d'évolution géodynamique reposent sur des analyses structurales fines et généralisées. Ainsi que des analyses patientes des marqueurs cinématiques de la déformation, notamment dans les terrains granitiques, eux-même excellents marqueurs géométriques et chronologiques des événements tectoniques.

**Coupes schématiques (W-E) montrant les trois principales étapes du modèle d'évolution tectonique du craton du São Francisco dans l'état de Bahia lors de l'orogénie transamazonienne**

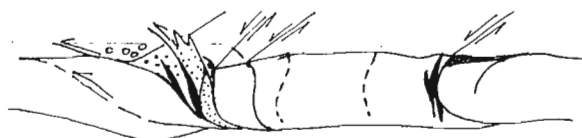


**2,1 à 2,08 Ga :**  
Début des processus de collision;  
Développement des bassins d'avant-chaine (ex. bassin de Jacobina);  
Épaississement crustal



**2,08 à 2,0 Ga :**  
Propagation vers l'ouest des bassins d'avant-chaine, contemporaine du chevauchement vers l'ouest;  
Extension dans la zone de flambage de la plaque continentale subductée (bloc du Gavião) et production du magmatisme mafique (source probable de l'or);  
Intrusion syn-cinématique de granites et soulèvement de la croûte continentale du bloc de Jequié.

**2,0 à 1,9 Ga :**  
Fin des processus de collision;  
Intrusion des granites peralumineux;  
Chevauchement associé à des décrochements sénestres.  
Circulations hydrothermales, migration et concentration de l'or dans les zones tectonisées;



D'après Ledru *et al.* 1994, Ledru 1995

## Système informatique géoréférencé

La dernière étape de ce projet visait à combler le retard en terme de numérisation des informations géologiques et géophysiques. En effet, outre la perte d'informations que cela implique à plus ou moins court terme, l'absence de base de données pertinemment organisée empêche toute interprétation intégrée et limite considérablement l'usage de ces connaissances pour les futurs utilisateurs. Or, l'accessibilité rationnelle à de telles informations constitue le support des prises de décisions pour la prospection et pour la définition des stratégies de gestion des territoires concernés. Elle représente une des principales clés de leur développement dans le domaine des ressources minérales. L'IRD et son partenaire de l'UFBA, de la CBPM et du SGB/CPRM, se sont attachés à mettre en place un Système Informatique Géoréférencé (SIG), en vue, à terme, de la modélisation géodynamique 3D du Précambrien du craton du São Francisco, dans l'état de Bahia. Celui-ci a pour but, en premier lieu, de constituer une base de données hiérarchisant la totalité des données géologiques et géophysiques acquises par l'équipe franco-brésilienne, au cours des programmes antérieurs, ainsi que par les institutions associées ayant apporté leur collaboration sur diverses cibles du Précambrien de Bahia.

Le nombre de données sur lesquelles se base notre synthèse géodynamique est extrêmement élevé. Les cibles de la dernière étape du programme, à elles seules, rassemblent plus de 9000 points d'affleurements répertoriés avec au moins autant de descriptions pétrographiques, des centaines de déterminations chimiques et minéralogiques et des dizaines d'analyses isotopiques.

L'implantation d'une base exhaustive pluridimensionnelle, et représentative de l'ensemble de ces données, est devenue incontournable pour leur pérennisation et leur exploitation au moyen des divers outils existant ou à créer (modélisations géodynamique, pétrogénétique, analyse automatique d'images, traitements graphiques, etc.). Il s'agissait, dans le SIG, de mettre en place une méthode d'organisation des données et de l'organisation du traitement de leur ensemble, en terme géoréférencés, de manière à pouvoir les utiliser avec les outils informatiques de modélisation.

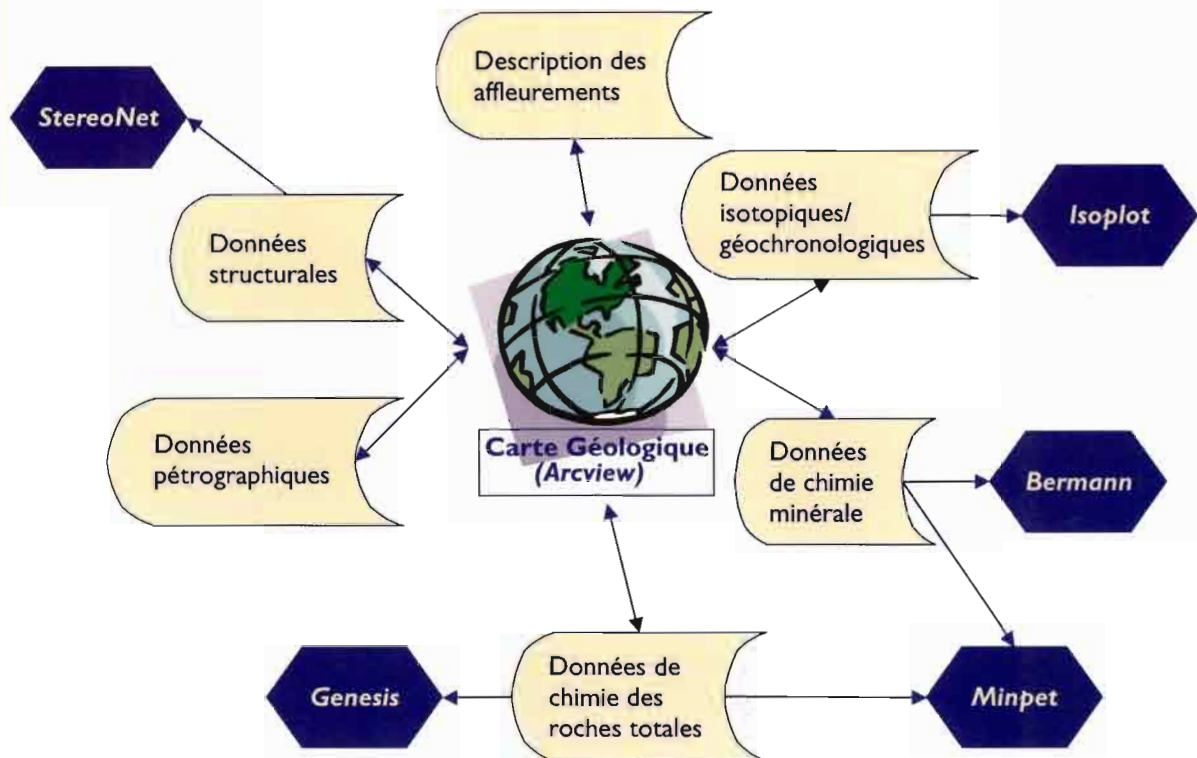
Ces informations géoréférencées serviront de support pour le diagnostic et la vérification du fonctionnement des systèmes étudiés. Elles permettront de contrôler la distribution spatiale des objets, ou l'application des processus, ainsi que d'établir les relations entre les composants et les variables des systèmes (Ex. relation entre mécanismes structuraux, processus hydrothermaux et minéralisations).

À cet effet, le support topographique à 1/100.000 a été numérisé et vectorisé en grande partie (rappelons que les régions étudiées représentent plus de la moitié de la surface de la France). Les autres informations qualitatives et quantitatives seront enregistrées avec indication de leurs sources. Ce sont, par exemple, les données :

- Lithologiques et structurales, globales, aux échelles des levés géologiques et des interprétations d'images et de détail, aux échelles spécifiques (1/50.000 à 1/10.000) des objets géologiques considérés (ex. structures internes des corps plutoniques) ;
- Cinématiques, pour la reconstitution tridimensionnelle des processus évolutifs ;
- Géophysiques (gravimétrie, magnétométrie, etc.) ;
- Géochronologiques (âges isotopiques des sources, des protolithes...) de chronologie relative et paramètres associatifs ;
- Pétrologiques (géochimie, minéralochimie...) ;
- Métamorphiques (thermodynamique...) ;
- Sédimentologiques (environnement de dépôts, critères géodynamiques) ;
- Métallogéniques (aux diverses échelles de prospectifs : mines, gisements, garimpos, indices minéralisés, distributions de teneurs en métaux dans les sols, les alluvions, etc.) ;
- La liste n'est pas limitative et pourra s'ouvrir aux autres besoins (ex. hydrologie, pédologie, etc.).

Le SIG est structuré de telle manière que les données peuvent être immédiatement traitées de l'échelle de l'échantillon à celle des massifs rocheux, à l'aide des outils informatiques usuels de géochimie, pétrologie, structurologie et de modélisation pétrogénétique. A cet effet, l'équipe a mis au point un logiciel de modélisation pétrogénétique (GENESIS), dont la dernière version (IV) sera disponible en 2006.

## STRUCTURE GÉNÉRALE DU SIG-BAHIA



les logiciels classiques de traitement spécifiques des données géologiques et géochimiques sont indiqués sur fond bleu et sont accessible dans le commerce de *softwares* ou gratuitement pour certains (ex. *Bermann*, *Isoplot*) – Le logiciel *GENESIS* est un produit conçu et réalisé par ce programme de recherche IRD/CNPq, L.R. Teixeira, thèse doct. 1998

## POUR EN SAVOIR PLUS

Sabaté, P. & Barbosa, J.S.F., 2000. The northern São Francisco craton. In W. Teixeira *et al.* (org.) *Archean and Paleoproterozoic tectonic evolution of the São Francisco craton: Spec.Vol.* U.G.Cordani *et al.*(ed.) *Tectonic Evolution of South America*. 31<sup>st</sup> International Geological Congress, Rio de Janeiro, p. 101-137.

Barbosa J.S.F. & Sabaté, P., 2001. Geological features and the Paleoproterozoic collision of four Archean crustal segments of the São Francisco craton, Bahia, Brazil : A synthesis. *Annals Brazilian Academy of Sciences*. 74 (2) : 343-374.

Milesi, J. P., Ledru, P., Marcoux, E., Mougéot, R., Johan, V., Lerouge, C., Sabaté, P., Bailly, L., Respaut, J. P. and Skipwith, 2001. The Jacobina paleoproterozoic gold-bearing conglomerates, Bahia, Brazil: a "hydrothermal shear-reservoir model". *Ore Geology Reviews*, 19 : 95-136.

Nascimento, H.S. do, Bouchez, J-L., Nédélec, A., Sabaté, P., Evidence of an early N-S magmatic event in the Paleoproterozoic Teofilândia granitoids (Sao Francisco craton, Brazil): a combined microstructural and magnetic fabric study : *Precambrian Research* 134 : 41-59.

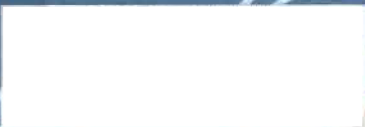
Barbosa J.S.F. & Sabaté, P., 2004. Archean and Paleoproterozoic crust of the São Francisco Craton, Bahia, Brazil :Geodynamic features. *Precambrian Research* 133 : 1-27.



Recherches de

# L'IRD

au **Brésil**  
depuis 1998



**IRD**

Institut de recherche  
pour le développement



**Conception graphique**  
**Fernando Brandão**

**Impression et reliure**  
**Charbel Gráfica e Editora**