

La métallogénie de l'or : évolution des modèles et cibles prioritaires de la recherche au fil des années

Vincent Bouchot¹ et Jean-Pierre Milesi².

Introduction

L'évolution de la connaissance sur l'or et les modèles métallogéniques associés n'est pas linéaire car intimement liée aux variations du prix du métal jaune. Le déclenchement d'un nouveau rush aurifère se traduit par la prospection de nouveaux terrains de jeux et l'acquisition concomitante de nouvelles données, tant en exploration qu'en R&D. La capitalisation de ces nouvelles informations aboutit, à moyen terme, à l'émergence de nouveaux modèles de gisements, moyens efficaces de synthétiser la connaissance à un moment donné. L'exemple de la ruée aurifère des années 1980-90 a été, à cet égard, très fructueuse en termes d'innovations conceptuelles. Quelle sont ces innovations ?

La notion de système minéralisateur aurifère, fondée sur une vision globale du phénomène aurifère, a permis d'agréger de multiples modèles unitaires de gisements différents, considérés antérieurement sans lien entre eux. Ce fut notamment le cas du système d'or orogénique, qui compte tenu de la grande variété des gisements associés – allant du classique « filon quartzeux aux sulfures disséminés dans les BIF –, a longtemps été source de controverses entre métallogénistes.

Les systèmes minéralisateurs fonctionnent à des périodes précises de l'évolution de la Terre (crises aurifères) et affectent des tronçons de lithosphère considérables (Provinces métallifères) parce qu'ils résultent de phénomènes géodynamiques particuliers (par exemple : zone de subduction, chaîne collisionnelle...). À cet égard, les modèles élaborés doivent permettre de prédire la localisation de nouvelles provinces métallifères (gîtologie prévisionnelle).

Autre nouveauté, des passerelles ont été tendues entre des modèles à l'origine apparemment incompatibles (exemple : modèles détritiques *versus* épigénétiques) comme l'exemple remarquable du Witwatersrand qui sera largement discuté dans cet article. Plus globalement, les modèles ont permis de mieux cerner l'étagement vertical des minéralisations dans la croûte, clé essentielle pour l'exploration : c'est notamment le cas du modèle or orogénique.

Comme c'est le cas pour tout géoscientifique, le modèle qu'il développe possède ses limites. Ainsi, à l'occasion d'un nouveau « saut de connaissance », le modèle devra être amélioré, modifié, transformé, bref dépassé pour, *in fine*, découvrir de nouveaux gisements.

L'objectif de cet article est de montrer, à partir des deux grands modèles de système minéralisateur aurifère, comment la connaissance métallogénique a évolué ces 15 dernières années. On abordera ensuite les modèles émergeant actuellement, compte tenu du foisonnement de connaissances lié au nouveau rush minier.

Le système minéralisateur or orogénique

Les gisements d'or épigénétiques mis en place en contexte orogénique offrent une large variété d'encaissants lithologiques, de contextes structuraux et *in fine* de morphologies des corps minéralisés. Ainsi, avant les années 1990, de multiples modèles descriptifs, ont pu être proposés (voir Bache, 1987), l'accent étant mis sur la lithologie de l'encaissant (*greenstones belt hosted*, *turbidite hosted*, *metamorphosed rocks hosted*, *BIF hosted*,

1. Courriel : v.bouchot@brgm.fr

2. Courriel : jean-pierre.milesi@areva.com

listvenite type...), sur le contrôle structural (*shear zone aurifère, fold related, flat faults related, tension gashes vein type*), sur la morphologie des minéralisations (*saddle reef*) ou encore sur leur faible quantité de sulfures associés (*low-sulfide Au-quartz veins*). À l'époque, la grande majorité des gisements exploités concernaient des veines quartzueuses à fortes teneurs, de l'ordre de 10 g/t Au.

Au début des années 1990, ces modèles spécifiques ont été agrégés pour aboutir à un modèle conceptuel global soutenant que cette diversité résultait principalement de l'étagement des gisements archéens dans la croûte entre 20 km et la subsurface (Fig. 1). Le modèle de continuum crustal des gisements d'or orogénique était né, les principaux concepteurs en étant Colvine *et al.* (1989) au Canada (craton du Supérieur) et Groves *et al.* (1993, 1998) en Australie (craton du Yilgarn). En parallèle, des modèles orogéniques émergeaient pour d'autres périodes orogéniques, appuyant ainsi la notion de crises aurifères à la fin de l'édification des chaînes éburnéenne (Milesi *et al.*, 1989), calédonienne (Bierlein *et al.*, 1999), varisque (Boiron *et al.*, 2003, Bouchot *et al.*, 2005), en plus de l'Archéen.

La **première idée force** du modèle de continuum réside dans le fait que les gisements peuvent se former à des profondeurs considérables, dans le domaine ductile *sensu stricto*, jusqu'en limite granulite/amphibolite..., alors qu'antérieurement le paradigme soutenait que les gisements se mettaient en place quasi exclusivement à la limite ductile-cassant, les ouvertures ne pouvant s'effectuer en ductile franc. L'existence des gisements de

Kolar (Inde), Renco (Zimbabwe) ou Griffins Find (Australie) en sont des exemples remarquables. Ainsi, l'ancienne terminologie « or mésothermal » est remplacé par l'appellation « or orogénique » où le gisement est qualifié (Fig.1) de épi-, meso- ou hypo-zonal en fonction de sa profondeur de mise en place (Groves *et al.*, 1998). De nouvelles provinces, anciennement délaissées, sont alors explorées, aboutissant à la découverte de grands gisements (*Southern Cross belt* en Australie, Tasiast en Mauritanie). De la même façon, on s'intéresse à des domaines très peu métamorphiques car susceptibles de contenir des gisements, marqueurs des *tops* de systèmes minéralisateurs : le gisement archéen de Wiluna en Australie occidentale (5 km) et celui du gisement du Châtelet (1 km) ont été interprétés en ces termes. Pour l'exploration, un témoin remarquable de l'étagement des gisements dans la croûte concerne les altérations hydrothermales, qui, du sommet vers la base du système, se traduisent par des halos à kaolinite (subsurface), à séricite-chlorite (épizone), à biotite (mésosone) puis à diopside (hypozone).

Une **seconde idée force** du modèle concerne un point peu connu, à savoir la variété du contexte structural pendant le piégeage des minéralisations. Même si la proximité des zones de cisaillement s'avère un contexte privilégié pour le contrôle des gisements orogéniques (notion de réseaux de faille de premier et deuxième ordre), il apparaît que, localement dans le bâti orogénique, des blocs lithologiques soumis à des phénomènes de tension pures (peu ou pas de cisaillement observés sinon en bordure des blocs) peuvent constituer des sites remarquables de piégeage de l'or. C'est notamment le cas des gisements archéens de Mount-Charlotte ou de Coolgardie (Australie) où les phénomènes de tension provoquent l'ouverture de multiples fentes de quartz (conduits des fluides) et où l'encaissant magmatique basique, riche en fer (micromagnétites disséminées), va interagir avec les fluides aurifères pour former de multiples halos sulfurés à or disséminé qui, connectés entre eux, forment de grands volumes exploitables. De tels gisements peuvent aujourd'hui être exploités à basse teneur (3-5 g/t), en souterrain par la méthode de *block caving*. Un tel modèle échappe au modèle classique de filon quartzueux aurifère et a ouvert de nouvelles perspectives pour l'exploration.

Une **troisième idée force** du modèle montre l'importance des phénomènes de soulèvement du bâti pendant le dépôt polyphasé de la minéralisation. Cette remontée se traduit notamment par une paragenèse rétromorphique de l'altération hydrothermale par rapport à celle du pic du métamorphisme, du moins quand le gisement se forme en conditions méso à

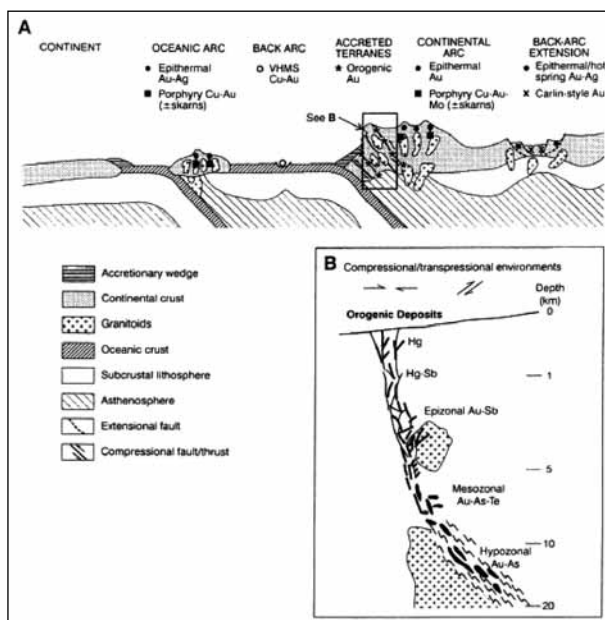


Figure 1. Modèle archéen de continuum avec étagement vertical des gisements.

épizonales. Le modèle orogénique varisque, établi dans le Massif central français par Bouchot *et al.* (2005) soutient que l'intensité du soulèvement varie d'un bloc litho-structural à un autre : ainsi, le bloc contenant le gisement profond de Salsigne aura été soumis à un soulèvement très intense en raison de sa position proximale par rapport au dôme granito-gneissique de la Montagne noire alors que le bloc contenant le gisement superficiel du Châtelet n'aura peu ou pas été soulevé et donc ainsi préservé de l'érosion (Fig.2, p.43). En complément, Boiron *et al.* (2003) insistent sur le mélange entre les fluides aurifères profonds et les eaux météoriques pour la précipitation de l'or dans la croûte supérieure.

Une **quatrième idée force** concerne le calage temporel des gisements. En premier lieu, l'analyse structurale des minéralisations « stratoïdes » a permis de prouver leur caractère épigénétique (exemples : BIF aurifères, minerai 2X de Salsigne) alors que la polémique syngénétique *versus* épigénétique était encore vive dans les années 1980. Cependant, des concentrations aurifères précoces, bien qu'affectées par le métamorphisme orogénique, ont pu être identifiées ; c'est par exemple le cas des pipes tourmaliniques de Loulo (Mali, Milesi *et al.*, 1989), des minéralisations épithermales de St-Georges sur Loire (Massif armoricain), des paléoplacers du Witwatersrand (Afrique du Sud ; cf. § 2). Il s'avère que ces minéralisations précoces ont pu être remobilisées lors de l'orogène. Concernant l'âge des gisements orogéniques, les données géochronologiques acquises pendant ces 15 dernières années (en Ar/Ar, Re/Os, U/Pb) ont démontré que, à un point donné de la chaîne, l'événement aurifère s'est produit pendant un court laps de temps de l'ordre de 10 Ma (300-310 Ma, vers 2,6 Ga dans l'archéen, vers 2,08 Ga dans le Birrimien), mais que la crise métallifère en question peut être diachrone d'une zone à une autre au sein d'un même craton.

Une **cinquième et dernière idée force**, pour notre propos, concerne le rôle des magmas. La plupart des travaux faits dans le domaine de l'or orogénique ont montré que les magmas constituent une source négligeable de l'or des systèmes orogéniques (Groves *et al.*, 1998, Boiron *et al.*, 2003, Bouchot *et al.*, 2006), l'origine de l'or étant à rechercher de préférence dans la croûte profonde voire dans le manteau. Cependant des travaux récents, notamment ceux de Lang et Baker (2001), suggèrent que dans des conditions orogéniques singulières bien qu'encore mal contraintes (accrétion à collision), les intrusions magmatiques peuvent constituer les sources principales de l'or. Il en résulte un modèle, non encore stabilisé, dénommé « *Intrusion-related gold system* » qui progresse dans les esprits ! Dans le varisque, ce type émergent contient les gîtes de référence portugais de Jales et Salave et les gîtes

espagnols de El Valle ou Bruès (Gloaguen, 2006). Dans le Birrimien d'Afrique de l'Ouest, ce modèle est solidement défendu pour les gisements orogéniques de Yaou, Yamfo ou Angovia.

En substance, après le développement du concept unificateur de gisement d'or orogénique, de nouveaux modèles tentent de s'individualiser permettant *in fine*, de représenter au mieux la complexité des phénomènes. On peut se demander jusqu'où ira ce foisonnement ? L'avenir de la métallogénie nous le dira !

Le système minéralisateur Or Witwatersrand revisité

Quels ont été les ressorts du siècle de controverse dans l'histoire des modèles de formation des conglomérats aurifères du Witwatersrand et quels en étaient les enjeux miniers ? Rappelons les ordres de grandeur du Witwatersrand : 49 400 t d'or produits entre 1886 et 2003 ; près de 38 000 t en terre, soit la moitié environ des ressources d'or sur la planète (Frimmel et Minter, 2002). Il ne sera pas question ici de réécrire les papiers qui, à plusieurs époques, ont illustré et comparé les principaux modèles en présence (cf. les synthèses de Pretorius, 1974, 1975, 1991 et Frimmel et Minter, 2002, Frimmel, 2005), mais de les replacer à la fois dans leur contexte minier, économique et scientifique, depuis les années 80 à aujourd'hui.

Jusqu'au début des années 90, des guides de recherches « sédimentologiques » ne prenant pas totalement en compte une histoire complexe

Le modèle de « paléoplacers » était le modèle le plus utilisé depuis les années 60 (Minter, 1976, 1991). Ce modèle avait cependant évolué en modèle de « paléoplacers modifiés », pour tenir compte des événements survenus postérieurement aux dépôts des conglomérats. Toutefois, la nature et l'amplitude de ces événements étaient généralement considérées comme des remobilisations quasi *in situ*, limitées à l'enveloppe des « reefs » minéralisés.

La stratigraphie et la sédimentologie fine fournissaient des guides d'exploration précieux (Minter, 1976, 1991). Les études minéralogiques particulièrement soignées (Ramdhor, 1958, Minter, 1976 et Minter *et al.*, 1988) fournissaient des arguments pour témoigner de l'introduction précoce des minéralisations dans les sédiments : pyrite détritique, kérogène détritique, galets d'uraninite/pechblende partiellement préservés à la base de certaines lentilles de conglomérats, ou reconnaissables

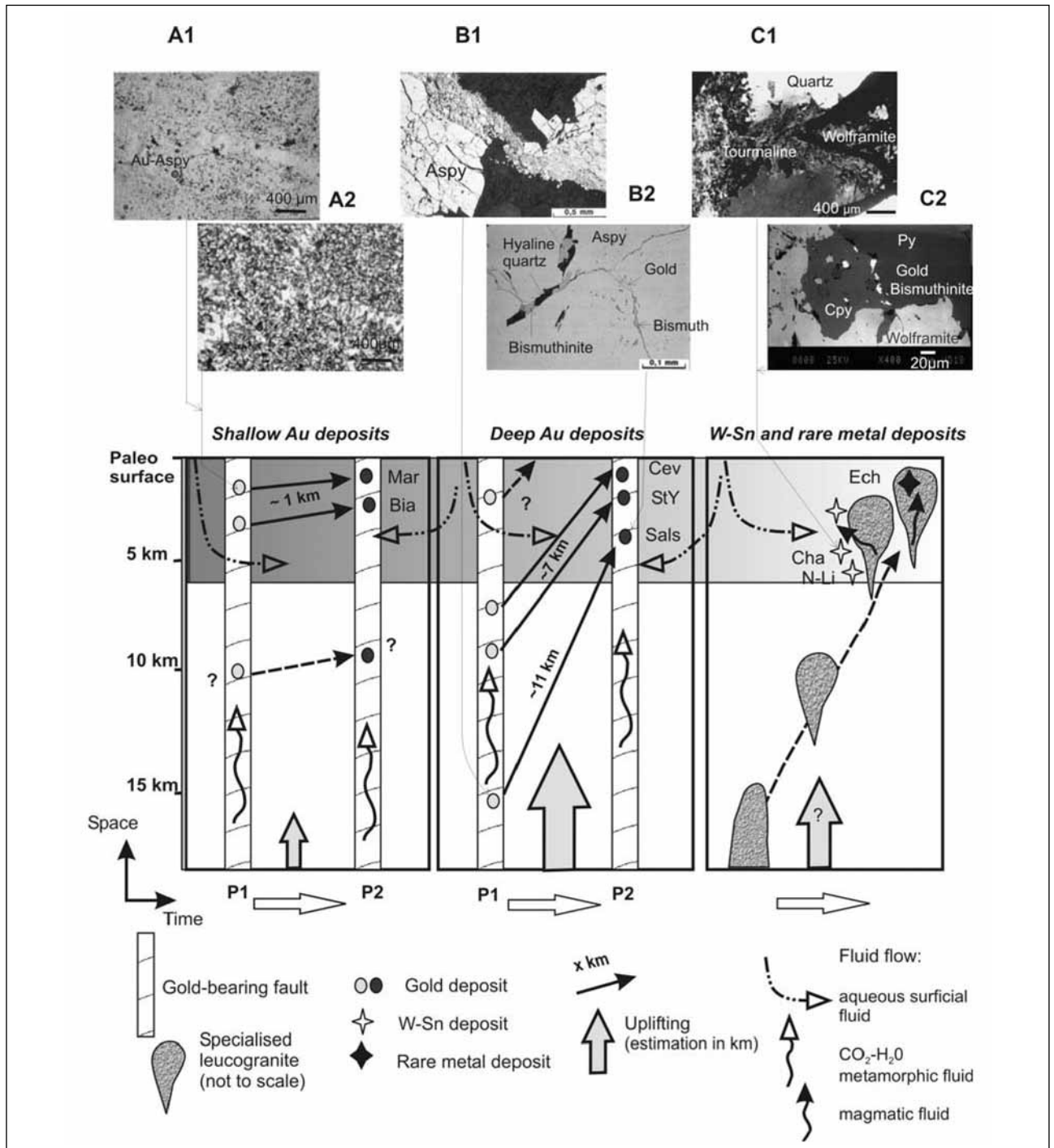


Figure 2. Modèle varisque avec soulèvement différentiel de blocs.

Légende : Mar = Marche, Bia = Les Biards, Cev = Cévennes, StY = Saint-Yrieix, Sals = Salsigne, Ech = Échassières, Cha = Le Châtelet, N-Li = Nord-Limousin.

sous forme de fantômes, pépites d'or, etc. Des processus *pro parte* syn-diagénétiques, liés à un environnement réducteur où des migrations limitées, étaient jugés responsables des modifications à courte distance perceptibles notamment sous la forme de : dissolution de l'uraninite suivie de la précipitation de titanates d'uranium (Smits, 1984, 1990), dispersion de brannérite

et de leucoxène uranifère, recristallisation des pyrites et de l'or, et présence, dans la paragenèse accompagnatrice, de nombreux minéraux métamorphiques. À cette époque, les sources de l'or et de l'uranium étaient peu étudiées ou discutées tandis que l'ampleur des migrations de ces substances n'était pas quantifiée.

L'histoire géologique complexe du Witwatersrand était reconnue (Pretorius, 1991), mais les guides utilisés, faisaient peu intervenir les phénomènes postérieurs aux dépôts. Certes des études tectoniques et métamorphiques, réalisées à la fin des années 80, apportaient un éclairage sur l'histoire complexe des dépôts (Burke *et al.* 1986, Stanistreet *et al.* 1986, De la Rey Winter, 1987), mais les guides de recherches « sédimentologiques » fondés sur des études pertinentes et fines focalisées sur les conglomérats, étaient encore fertiles et les sociétés minières les ont utilisées avec un certain succès.

Que s'est-il passé au début des années 90 ? ou encore une industrie morose, mais aussi un sursaut scientifique et l'émergence de nouvelles idées favorables à une relance

De Wit *et al.* (1993) rapportaient dans leur article la forte baisse des productions d'or entre 1970 et 1988, liée *pro parte* à la baisse des teneurs, suivie du chômage de 72 000 mineurs. Le modèle de « paléoplacer modifié » ne connaissait plus les succès escomptés par les sociétés minières et quelques échecs étaient évoqués dans les milieux industriels. Quelles solutions scientifiques pouvaient être alors apportées pour remédier à cette dramatique situation ?

De Wit *et al.* (1993) proposaient alors, sur des arguments géochronologiques et tectoniques, de développer la recherche de l'or hors du Rand, dans des bassins sédimentaires, synchrones du Witwatersrand, mais associés à des ceintures de roches vertes périphériques. En outre, le modèle « épigénétique » (« *epigenetic replacement model* »), développé entre 1987 et le début des années 90 (Philips *et al.* 1989 ; Philips et Myers, 1989), s'inspirant des travaux sur les gisements d'or orogéniques de Fyfe et Kerrich (1984), faisaient notamment intervenir des processus postérieurs à la sédimentation et à la diagenèse : circulation de fluides métamorphiques, remplacement épigénétique et alimentation/piégeage dans des drains structuraux, etc. Ainsi, les auteurs à l'origine de ce modèle et les études ultérieures de Robb et Meyer (1990, 1991) et de Barnicoat *et al.* (1997), intégraient des données jusqu'alors peu considérées et notamment que :

- l'or n'est pas restreint aux seuls conglomérats, puisque des filons de quartz aurifères avaient été exploités, et que des dykes, quartzites et shales anomaux en or étaient identifiés en de nombreux points du bassin ;
- l'or n'est pas non plus limité aux seuls sédiments du

Rand puisque des conglomérats de la base du groupe néoarchéen du Transvaal (par exemple le *Black Reef*, Phillips et Myers, 1989) sont également aurifères et riches en tourmaline (considérée comme typique des gisements de type exhalatif-sédimentaire) et en minéraux témoignant d'une paragenèse classique des gisements orogéniques (sphalérite, galène, rutile, bravoïte, etc.) ;

- l'or et l'uranium (brannérite, coffinite, leucoxène uranifère) des matrices recristallisées sont piégés dans des corps de minerais recoupant les strates conglomératiques ; ce point sera particulièrement développé par Barnicoat *et al.* en 1997 ;
- l'histoire du Witwatersrand montre plusieurs événements successifs : diagenétiques, métamorphiques (350°C et 2-3 kb), thermiques, hydrothermaux et tectoniques, postérieurement aux dépôts sédimentaires se développant entre 2,7 Ga (Ventersdorp) et 2,02 Ga (Vredefort) comme le démontraient progressivement les études de Philips *et al.* (1989), Philips et Myers (1989), Robb et Meyer (1995), Frimmel *et al.* (1993) et Frimmel, (2002). Ce modèle conduisait à fournir des guides structuraux et géochimiques complémentaires aux compagnies (Photos 1 et 2).

La source de la concentration d'or du Witwatersrand, la plus importante à l'échelle mondiale, et celle de l'uranium restent une question majeure dans ce débat entre « placéristes » et « hydrothermalistes-épigénétistes ». Quelles étaient les sources possibles de l'or (Robb et Meyer, 1990) ? Les terrains-sources étaient-ils suffisamment riches en or et uranium pour alimenter les sédiments du Witwatersrand ? À l'inverse, l'or était-il essentiellement du à un apport neuf, lié au fonctionnement du bassin du Witwatersrand ?

De nombreuses sources ont été évoquées et notamment :



Photo 1. *Black Reef*, mine de Grootvlei, mur du Kimberley Reef, détail des cisaillements bancs sur bancs (cliché Jean-Pierre Milési).

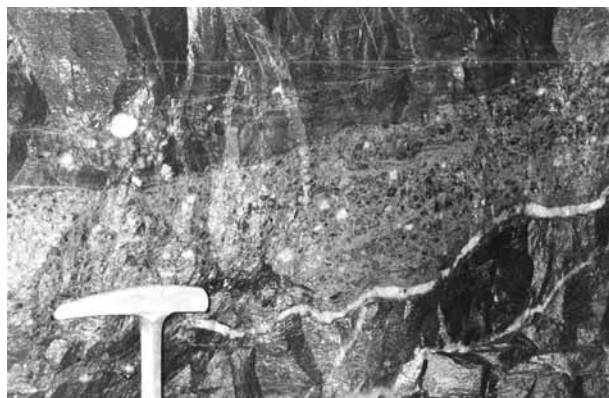


Photo 2. Black Reef, mine de Grootvlei, base du Transvaal paléoprotérozoïque, fond de chenal très riche en pyrite ; fente plate à quartz en base de chenal dont la mise en place est liée à un cisaillement banc sur banc. Cette photo montre bien que le phénomène Rand est multiphasé et qu'il ne s'est pas uniquement déroulé à l'Archéen.

- les granites pré-Rand à 3,05 Ga, anomaux en or-uranium, où les uraninites sont déjà arrondies ;
- les minéralisations aurifères orogéniques encaissées dans les ceintures de roches vertes ;
- les granites fertiles dont la mise en place est synchrone du Rand ;
- les exhalites synchrones de la sédimentation du Rand (Hutchinson et Viljoen, 1988, qui extrapolent leurs larges compétences sur les amas sulfurés volcanogéniques et les SEDEX).

Pour certains auteurs comme Robb et Myers (1990), l'origine de cette forte concentration d'or restait énigmatique, à savoir une insuffisance d'or dans les bassins d'alimentation et les granitoïdes bordiers, susceptibles de constituer les roches-sources du Rand. En revanche, les bilans de masse proposés par Loen (1992), permettaient de conclure que le facteur principal réside dans la durée du phénomène érosion/transport/ piégeage (~126 Ma au moins), plus que dans la richesse des roches-sources (estimée entre ~0,43 et 6,8 ppb Au). Cette dernière étude confortait les auteurs défendant le modèle de paléoplacer. Ceux-ci confirmaient, par leur études minéralogiques et texturales, la présence d'or pépitique (Frimmel *et al.*, 1993 ; Minter *et al.*, 1993, Oberthür et Frey, 1991), tout en prenant en compte les modifications liées à l'histoire des dépôts.

Ces nouvelles idées, intégrant à part entière les phénomènes postérieurs aux dépôts sédimentaires, produisirent un fort débat contradictoire dans la communauté scientifique ; mais quel fut l'impact de ces idées au niveau des sociétés minières ? Si certaines sociétés minières suivaient, dans les régions où les modifications étaient moins perceptibles, le modèle de « paléoplacers modifiés » (cas du SSW du bassin du Rand), d'autres ont

cependant changé sensiblement leur approche exploratoire, notamment pour les régions soumises à des intenses déformations (N et E du Bassin du Rand). Le BRGM (J.-P. Milesi) a visité à plusieurs reprises les gisements du Witwatersrand entre 1993 et 1995 et peut témoigner des changements qui s'opéraient alors au sein de compagnies qui allaient, pour certaines, jusqu'à licencier sédimentologues et stratigraphes et se renforçaient en géologues structuralistes et géophysiciens.

Finalement la réponse de ces compagnies semble s'être orientée vers un resserrement des mailles de forages et un développement accru des approches géophysiques pour prendre en compte le plus grand nombre de phénomènes possibles.

Où en sommes nous depuis les années 90 ?

Du point de vue scientifique, plusieurs articles ont tenté de concilier les observations et modèles ; citons notamment ceux de Pretorius (1991), Robb et Meyer (1991, 1995), Phillips et Law (1994), Frimmel *et al.*, (1993), Robb *et al.*, 1997, Frimmel et Gartz (1997), Minter (1999), Frimmel et Minter (2002), Poujol *et al.* (2002), et Frimmel (1997, 2005). Ces articles illustrent l'histoire complexe des minéralisations et des hydrothermalismes du Rand en relation avec une évolution tectono-thermique polyphasée. Une question essentielle se posait du point de vue minier : les concentrations exploitables sont-elles mises en place lors des processus postérieurs aux dépôts ou essentiellement dues aux processus précoces liés à la sédimentation, puis modifiées ? Dit autrement, la concentration en métal résulte-t-elle d'un apport juvénile durant l'histoire tectono-métamorphique du bassin ou de la reprise d'un stock d'or-uranium ancien durant cette histoire ?

Une vaste panoplie d'études a été mise en œuvre – analyses structurales, métamorphiques, minéralogiques / texturologiques, géochimiques isotopiques, géochronologiques, etc. –, permettant de faire progresser ce débat. Quelles en sont les conclusions importantes ?

L'introduction du stock métal (Kirk *et al.*, 2002) s'effectuerait autour de 3,03 Ga, d'après les isochrones rhénium-osmium obtenues sur les grains d'or et les pyrites, quelles que soit leurs morphologies (précoces ou modifiées postérieurement à leur dépôts). Ces données confirment les âges obtenus antérieurement sur pyrites (Koppel et Saager, 1974) et sphalérites (Giusti *et al.*, 1986) autour de 3,2 - 3,3 Ga. Frimmel (2005), considérant que l'âge de l'or, des pyrites et de l'uraninite est antérieur à l'âge des sédiments, et donc aux phénomènes hydrothermaux postérieurs, confirme le modèle de paléoplacer modifié par des événements postérieurs, qu'il contribue à mieux définir.

À l'opposé, Barnicoat *et al.* (1997) suggèrent que la mise en place de l'or est hydrothermale, oblique sur les strates, postérieure à un événement thermique de haute température, marqué par la présence de pyrophyllite (+ disthène) et qu'elle se fait à la faveur des drains et pièges tectoniques. Ces auteurs mentionnent encore que tous les grains d'or qu'ils ont étudiés (40 000) sont épigénétiques. Robb *et al.*, (1997) proposent une reconstitution détaillée de l'histoire tectono-thermique du bassin et reconnaissent au moins trois événements majeurs postérieurs aux dépôts : (i) une première circulation de fluide, à ~2,55 Ga, marquée par la cristallisation de pyrites authigènes et de rutilés (i.e. rutilés à 2.578 Ga), (ii) un second événement, vers 2,35 Ga, correspondant à la circulation de fluides à hydrocarbures, marqué par la formation de bitumes (à ~2,33-2,38 Ga) et de sulfures de Fe, Cu et As et (iii) au Paléoprotérozoïque, une précipitation tardive d'or et de sulfures, en relation avec la mise en place du Bushveld (2,05 Ga) et de l'impactite de Vredefort (2,02 Ga). Dès 1991, Robb et Meyer avaient montré que les hydrocarbures remplaçaient l'uraninite et que les veines à hydrocarbures étaient postérieures aux réseaux de veines de pyrrhotite impliquant la présence de phénomènes postérieurs aux dépôts sédimentaires.

Il ressort bien des différentes études que les « modifications » et phénomènes sont régionaux et affectent avec plus ou moins d'intensité toutes les minéralisations du bassin.

Quel peut être l'apport des études réalisées sur d'autres gisements du même type ?

Parallèlement à l'étude du Rand a été entreprise celle du bassin syn-tectonique de Jacobina au Brésil qui renferme des minéralisations à or-uranium (Ledru *et al.*, 1997 ; Milesi *et al.*, 2002). Comme dans le Witwatersrand, outre les conglomérats, sont identifiés des anomalies aurifères dans des quartzites, des filons de quartz et des quartzites, exploitées par des mines artisanales. Le modèle proposé par ces auteurs prend en compte :

- une migration de la sédimentation (de l'Est vers l'Ouest) induite par le déplacement dans le même sens des blocs paléoprotérozoïques, en lien avec le chevauchement des terrains sur le bloc archéen de Gavião ;
- une migration de fluides à l'échelle du bassin, marquées notamment par des stockwerks de minéraux alumineux (andalousite, disthène, etc.) recoupant les stratifications entrecroisées ;
- une concentration de l'or et des sulfures, postérieure aux silicates d'alumine, dans des réservoirs conglomératiques alimentés par des zones de cisaillement à

sulfures et/ou quartz et présentant des paragenèses peu différentes de celles des gisements orogéniques.

Dans ce modèle de Jacobina, les concentrations aurifères semblent donc synchrones de l'évolution tectono-métamorphique du bassin et des circulations de fluides hydrothermaux induites par cette histoire. Remarquons également que si les traces d'un or précoce demeurent encore à démontrer à Jacobina, des indications isotopiques sur les galènes montrent que celles-ci ont connu une histoire antérieure au dépôt des sédiments : remobilisation isotopique partielle. Il n'est donc pas impossible d'imaginer une remobilisation à l'échelle du bassin de minéralisations précoces archéennes (?), mais dont les traces sont très ténues.

Un modèle intégré : deux clefs complémentaires

Un stock métallifère précoce, issu de différentes sources, bénéficiant au Rand d'une grande durée des processus d'érosion/transport/sédimentation est l'une des clefs de l'or et de l'uranium du Rand. Mais ce ne sont vraisemblablement pas ces minéralisations qui sont exploitées, car elles ont été régionalement modifiées postérieurement à leur dépôt. Les concentrations exploitées dépendent des processus néoarchéens et protérozoïques, postérieurs aux dépôts. Les clefs sont alors les processus de transport et de piégeage des fluides durant l'histoire thermo-tectonique du bassin sédimentaire. Les minéralisations précoces d'or-uranium sont remobilisées dans des réservoirs où les contrôles sont chimiques et physiques-rhéologiques (perméabilité de fracture, porosité, etc.). Il s'avère, ce qui n'exclut pas la présence plus discrète de minéralisations dans les autres roches sédimentaires et les filons de quartz, que les conglomérats, par leurs propriétés physiques constituent d'excellents réservoirs, ce qui réconcilie les guides suivis depuis plus de 100 ans.

Conclusions

À travers ces deux exemples de modèle (or orogénique et or du Witwatersrand), on montre comment les modèles métallogéniques naissent, mûrissent, voire disparaissent, bref comment ils formalisent notre degré de connaissances sur les gisements et, d'autre part, comment ces modèles peuvent avoir une incidence sur l'exploration minière, en termes de guides d'exploration.

Bibliographie : or orogénique

- Goldfarb R.J., Groves D.I., Gardoll S., 2001. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. *Ore Geo. Rev.* 18, 1–75.
- Groves D.I., 1993. The crustal continuum model for late-Archaean lode gold deposits of the Yilgarn Block, Western Australia. *Mineralium Deposita* 28, 366–374.
- Groves D.I., Goldfarb R.J., Gebre-Mariam M., Hagemann S.G., Robert F., 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of the crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews* 13, 7–27.
- Bierlein F. P., Foster D. A., Mcknight S., Arne D. C. (1999) - Timing of gold mineralisation in the Ballarat goldfields, central Victoria: constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ results. *Australian Journal of Earth Sciences*, Vol 46, Issue 2, 301.
- Milesi J.P., Feybesse J.L., Ledru P., Dommanget A., Ouedraogo M.F., Marcoux E., Prost A., Vinchon C., Sylvain J.-P., Johan V., Teguey M., Calvez J.Y., Lagny P., Abouchamy W., Ankrah P., Boher M., Diallo M., Fabre R., Henry C., Lapiere H., Pons J., Thieblemont D., Toure S. et Morel B. (1989) Les minéralisations aurifères de l'Afrique de l'Ouest. *Chronique de la Recherche Minière*, 497, 3-98.
- Bache J.J., 1987, *World Gold Deposits*: New York, Elsevier, 160 p.
- Bouchot V., Ledru P., Lerouge C., Lescuyer J.L., Milesi J.P. (2005) Late Variscan mineralizing systems related to orogenic processes: The French Massif Central. *Ore Geol. Rev.*, Vol. 27, 169-197.
- Boiron M.-C., Cathelineau M., Banks D.A., Fourcade S., Vallance J., 2003. Mixing of metamorphic and surficial fluids during the uplift of the Hercynian upper crust: consequences for gold deposition. *Chemical Geology* 194, 119–141.
- Gloaguen E. (2006) - Apports d'une étude intégrée sur les relations entre granites et minéralisations filoniennes (Au et Sn-W) en contexte tardi-orogénique (Galice centrale, Espagne). Thèse de l'Université d'Orléans, 572 p.
- De la Rey Winter H., 1987. A cratonic foreland model for Witwatersrand Basin development in a continental back-arc, plate-tectonic setting. *S. Afr. J. Geol.*, 90, 409-427.
- Feybesse J.L., Billa M., Guerrot C., Duguey E., Lescuyer J.L., Milesi J.P., Bouchot V., 2006. The Paleoproterozoic Ghanaian province: Geodynamic model and ore controls, including regional stress modeling. *Precambrian Research*, 149, 149-196.
- Frimmel H.E., Le Roex A.P., Knight J. and Minter W.E.L., 1993. A case study of the postdepositional alteration of the Witwatersrand Basal Reef gold placer. *Econ. Geol.* 88, 249–265.
- Frimmel H.E., 1997. Detrital origin of hydrothermal Witwatersrand gold-a review. *Terra Nova*, 9, 192-197.
- Frimmel H.E. and Gartz V.H., 1997. Witwatersrand gold particle chemistry matches model of metamorphosed, hydrothermally altered placer deposit. *Mineralium Deposita* 32, 523–530.
- Frimmel H.E. and Minter W.E.L., 2002. Recent developments concerning the geological history and genesis of the Witwatersrand gold deposits, South Africa. In: Goldfarb, R.J., Nielsen, R.L. (Eds), *Integrated Methods for Discovery: Global Exploration in the Twenty-First Century*. Special Publication vol.9, Society of Economic Geologists, Littleton, 17-45.
- Frimmel H.E., 2005. Archean atmospheric evolution: evidence from the Witwatersrand gold fields, South Africa. *Earth-Science Reviews*, 70, 1-46.
- Fyfe W.S., Kerrich R., 1984. Gold: Natural concentration processes. In: Foster R.P. (Ed.), *Gold'82*, Rotterdam, A.A. Balkema Pub., 99-127.
- Giusti L., Hallbauer D.K., Allsopp H.L., Evans I.B., Welke H.J., 1986. Dating and isotopic characterization of components of Witwatersrand conglomerates and possible source rocks: *Geocongress 86'*, Johannesburg, July 7-11, 123-137.
- Harcouët V., Guillou-Frottier L., Bonneville A., Bouchot V., Milesi J.P., 2007. Geological and thermal conditions before the major Palaeoproterozoic gold-mineralization event at Ashanti, Ghana, as inferred from improved thermal modelling. *Precambrian Research* (in press).
- Hutchinson R.W., Viljoen R.P., 1988. Re-evaluation of gold source in Witwatersrand ores. *S. Afr. J. Geol.*, 91(2), 157-173.
- Kirk J., Ruiz J., Chesley J., Walshe J., England G., 2002. A major Archean, gold- and crust-forming event in the Kaapvaal craton, South Africa. *Science*, Vol., 297, 1856-1858.
- Koppel V.H., Saager R., 1974. Lead isotopes evidence on the detrital origin of Witwatersrand pyrites and its bearing on the provenance of the Witwatersrand gold. *Econ. Geol.* 69, 318–381.
- Ledru P., Johan V., Milesi J.-P., Teguey M., 1994. Markers of the last stages of the Palaeoproterozoic collision: evidence for a 2 Ga continent involving circum-South Atlantic provinces. *Precambrian Research* 69, 169–191.
- Ledru P., Milesi J.P., Johan V., Sabaté P., Maluski H., 1997. Foreland basins and gold-bearing conglomerates: a new model for the Jacobina Basin, São Francisco Province, Brazil. *Precambrian Research*, 86, 155-176.
- Loen J.S., 1992. Mass-balance constraints on gold placers: possible solutions to "source area problems". *Econ. Geol.* 87, 1624-1634.

Bibliographie Witwatersrand

- Barnicoat A.C., Henderson I.H.C., Knipe R.J., Yardley B.W.D., Napier R.W., Fox N.P.C., Kenyon A.K., Munthig D.J., Strydom D., Winkler K.S., Lawrence S.R. and Cornford C., 1997. Hydrothermal gold mineralization in the Witwatersrand basin. *Nature* 386, 820-824.
- Burke K., Kidd W.S.F., Kusky T.M., 1986. Archean foreland basin tectonics in the Witwatersrand, South Africa. *Tectonics*, Vol. 5, 439-456.
- Davis D.W., Hirdes W., Schaltegger U., Nunoo E.A., 1994. U-Pb age constraints on deposition and provenance of Birimian and gold bearing Tarkwaian sediments in Ghana, West Africa. *Precambrian Research* 67, 89–1997.
- De Wit M.J., Armstrong R.A., Kamo S.L., Erlank A.J., 1993. Gold-bearing sediments in the Pietersburg greenstone belt: age equivalents of the Witwatersrand Supergroup sediments, South Africa. *Econ. Geol.* 88, 1242-1252.

- Milesi J.P., Ledru P., Ankrah P., Johan V., Marcoux E., Vinchon Ch., 1991. The metallogenic relationship between Birimian and Tarkwaian gold deposits in Ghana. *Mineralium Deposita*, 26, 228-238.
- Milesi J.P., Ledru P., Feybesse J.L., Dommanget A., Marcoux E., 1992. Early Proterozoic ore deposits and tectonics of the Birimian orogenic belt, West Africa. *Precambrian Research*, 58, 305-344.
- Milesi J.P., Ledru P., Marcoux E., Mougeot R., Johan V., Lerouge C., Sabaté P., Bailly L., Respaut J.P., Skipwith P., 2002. The Jacobina Paleoproterozoic gold-bearing conglomerates, Bahia, Brazil: a hydrothermal shear-reservoir model. *Ore Geol. Rev.*, 19, 95-136.
- Minter W.E.L., 1978. A sedimentological synthesis of placer gold, uranium and pyrite concentrations in Proterozoic Witwatersrand sediments. In: Miall A.D. (Ed.), *Fluvial Sedimentology*. Canadian Society of Petroleum Geologists, 801-829.
- Minter W.E.L., 1991. Ancient placer gold deposits. In: Foster, R.P. (Ed.), *Gold Metallogeny and Exploration*. Blackie, London, 283-308.
- Minter W.E.L., 1976. Detrital gold, uranium, and pyrite concentrations related to sedimentology in the Precambrian Vaal Reef placer, Witwatersrand, South Africa. *Econ. Geol.* 71, 157-176.
- Minter W.E.L., 1999. Irrefutable detrital origin of Witwatersrand gold and evidence of eolian signatures. *Econ. Geol.* 94, 665-670.
- Minter W.E.L., Feather C.E. and Glatthaar C.W., 1988. Sedimentological and mineralogical aspects of the newly discovered Witwatersrand placer deposit that reflect Proterozoic Weathering, Welkom Gold Field, South Africa. *Econ. Geol.* 83, 481-491.
- Minter W.E.L., Goedhart M.L., Knight J. and Frimmel H.E., 1993. The morphology of Witwatersrand gold grains from the basal reef. *Econ. Geol.* 88, 237-248.
- Oberthür T., Frey M., 1991. Mineralogical and geochemical investigations of ore components from Witwatersrand-type deposits: their genetic and exploration significance. ICAM'91, 2-4 September 1991., 2, Paper 39, 13p.
- Oberthür T., Vetter U., Davis D.W., Amanor J.A., 1998. Age constraints on the gold mineralization and Paleoproterozoic crustal evolution in the Ashanti belt of southern Ghana. *Precambrian Research* 89, 129-143.
- Phillips G.N., Myers R.E., 1989. The Witwatersrand gold fields: Part II. An origin for Witwatersrand gold during metamorphism and associated alteration. *Econ. Geol. Mon.* 6, 598-608.
- Phillips G.N., Myers R.E., Law J.D.M., Bailey A.C., Cadle A.B., Beneke S.D., Giusti L., 1989. The Witwatersrand gold fields: Part I. Postdepositional history, synsedimentary processes, and gold distribution. *Econ. Geol. Mon.* 6, 585-597.
- Phillips G.N., Law D.M., 1994. Metamorphism of the Witwatersrand gold fields: A review. *Ore Geol. Rev.* 9, 1-31.
- Poujol M., Robb L.J., Anhaeusser C.R., Gericke B., 2002. A review of the geochronological constraints on the evolution of the Kaapval Craton, South Africa., *Precambrian Research*, 127, 181-213.
- Pretorius D. A., 1974. Gold in the Proterozoic sediments of South Africa; systems, paradigms, and models. Information circular, University of the Witwatersrand, Economic Geology Research Unit 87, 2.
- Pretorius D.A., 1975. The depositional environment of the Witwatersrand goldfields: a chronological review of speculations and observations. *Minerals Science and Engineering*, 7, 18-47.
- Pretorius D. A., 1991. The sources of Witwatersrand gold and uranium: a continued difference of opinion. *Econ. Geol. Mon.* 8, 139-163.
- Ramdhor P., 1958. New observations on the ores of the Witwatersrand in South Africa and their genetic significance. *Transactions of the Geological Society of South Africa*, Vol. LXI, 50 p.
- Robb L.J., Meyer F.M., 1990. The nature of the Witwatersrand Hinterland: conjectures on the source area problem. *Econ. Geol.* 85, 511-536.
- Robb L.J., Meyer F.M., 1991. A contribution to recent debate concerning epigenetic versus syngenetic mineralization processes in the Witwatersrand Basin., *Econ. Geol.* 86, 396-401.
- Robb L.J., Meyer F.M., 1995. The Witwatersrand Basin, South Africa: Geologic framework and mineralization processes. *Ore Geol. Rev.* 10, 67-94.
- Robb L.J., Charlesworth E.G., Drennan G.R., Gibson R.L., Tongu E.L., 1997. Tectono-metamorphic setting and paragenetic sequence of Au-U mineralization in the Archean Witwatersrand Basin, South Africa. *Australian Journal of Sciences.* 44, 357-371.
- Smits G., 1984. Some aspects of the uranium minerals in Witwatersrand sediments of the Early Proterozoic. *Precambrian Research*, 25, 34-59.
- Smits G., 1990. Mineralogical evidence for geochemical environment at the earth's surface during deposition of Witwatersrand reefs. *Trans. Instn. Min., Metall., (Sect. B: Appl. Earth sci.)*, 101, B99-107.
- Stanistreet I.G., McCarthy T.S., Charlesworth E.G., Myers R.E., Armstrong R.A., 1986. Pre-Transvaal wrench tectonics along the Northern margin of the Witwatersrand.