

Le paléomagnétisme du Bouclier des Guyanes : état des connaissances et analyse critique des données

Hervé THÉVENIAUT ⁽¹⁾

Claude DELOR ⁽²⁾

Paleomagnetism of the Guiana Shield: current knowledge and critical analysis of the data

Géologie de la France, 2003, n° 2-3-4, 59-82, 11 fig., 2 tabl.

Mots-clés : Paléomagnétisme, Guyane, Guyana, Suriname, Brésil, Venezuela, Bouclier guyanais.

Key words: Paleomagnetism, French Guiana, Guyana, Suriname, Brazil, Venezuela, Guiana Shield.

Résumé

Le Bouclier des Guyanes est l'une des régions du globe où les formations géologiques couvrent une très grande période de l'histoire de la Terre depuis 3 Ga, avec prédominance des terrains précambriens. Trop peu d'études paléomagnétiques ont été réalisées depuis 40 ans sur cette région, et souvent avec des lacunes quant à la contrainte essentielle concernant l'âge de l'aimantation.

Au regard des contextes géologiques considérés (plutonique, métamorphique, volcanique, sédimentaire) et des processus géodynamiques envisagés, et sur la base de nouveaux critères de qualité des données, d'ordre paléomagnétique et isotopique, nous dressons ici un bilan des études paléomagnétiques qui y ont été réalisées et établissons des perspectives pour les études futures.

Les résultats actuellement disponibles laissent entrevoir une meilleure connaissance des évolutions paléogéographiques du Bouclier des Guyanes vers 2,15-2,05 Ga. La diversité des réponses paléolatitudoinales appelle cependant des études complémentaires, compte tenu du contexte géodynamique transamazonien où se pose la question de la mobilité de différents domaines du Bouclier guyanais les uns par rapport aux autres.

Pour les périodes comprises entre 1,9 et 1,4 Ga, les premiers résultats paléomagnétiques obtenus sur des formations plutoniques et sédimentaires méritent d'être abondés, et pour ce qui est des nombreuses phases d'activité volcanique, de nouvelles contraintes en âge sont à envisager.

Peu ou pas d'études ont jusqu'ici été entreprises entre 1,4 Ga et 200 Ma alors que cet intervalle de temps couvre un large éventail de formations, potentiellement

informatives pour l'ensemble du bouclier compte tenu de sa relative stabilité dans le même laps de temps.

Les épisodes volcaniques liés aux stades de fracturation jurassique pré-ouverture de l'océan Atlantique ont fait l'objet de nombreuses études qui permettent aujourd'hui de conclure que le bouclier se trouvait dans une paléoposition quasiment identique à celle actuelle. Enfin, si les formations sédimentaires post-Jurassique sont peu présentes et peu étudiées, les phénomènes d'altération qui ont affecté le Bouclier des Guyanes depuis quelques dizaines de millions d'années ont fait l'objet d'études récentes qui ont apporté de nouvelles contraintes très importantes sur ces phénomènes et devraient être poursuivies dans les années à venir.

Abstract

The Guiana Shield is one of the regions of our globe where the formations, which are predominantly Precambrian, cover a significant period of the Earth's history over the last 3 Ga. However, too few paleomagnetic studies of this region have been carried out within the last 40 years, and all too often these lack the essential constraints for determining the age of the magnetization.

In view of the considered geological contexts (plutonic, metamorphic, volcanic, sedimentary) and associated geodynamics, and on the basis of new quality criteria relative to the paleomagnetic and isotopic data, we have been able to analyse the past paleomagnetic studies and establish criteria for future studies.

The currently available results point to a better understanding of the paleogeographic evolution of the Guiana Shield at around 2.15-2.05 Ga. Nevertheless, further

(1) brgm Guyane, Domaine de Suzini - route de Montabo, BP 552, 97333 Cayenne Cedex 2, Guyane. E-mail : h.theveniaut@brgm.fr

(2) brgm, 3 avenue Claude-Guillemin, BP 6009, 45060 Orléans cedex 2, France

studies are required to explain the diversity of the paleolatitudinal responses in the context of Transamazonian geodynamics where questions arise as to the relative mobilities of the different domains of the Guiana Shield.

The first paleomagnetic results from the plutonic and sedimentary formations of the period between 1.9 and 1.4 Ga should be abundant, and new age constraints should be obtained for the many phases of volcanic activity.

Few studies, if any, deal with the period from 1.4 Ga to 200 Ma. Nevertheless, this is a time interval that is represented by a wide variety of formations that are potentially informative for the entire Shield given its relative stability over this period.

The Jurassic volcanic episodes associated with the stages of fracturing that preceded the opening of the Atlantic Ocean, have been the subject of abundant studies. The results of these studies allow us to conclude that the paleoposition of the Shield was just about the same as it is today.

Finally, although post-Jurassic sedimentary formations are relatively scarce, and therefore little studied, the weathering processes that have affected the Guiana Shield over the past few tens of millions of years have been the focus of recent investigations. These studies have yielded new and very important constraints concerning the weathering processes, and it is a line of investigation that should be continued in the coming years.

Resumo

O Escudo das Guianas é uma das regiões do globo cujas formações geológicas cobrem um período muito grande da história da Terra, desde 3 Ga atrás, com predominância de terrenos pré-cambrianos. Nos últimos 40 anos, muito poucos estudos paleomagnéticos foram realizados nessa região, os quais apresentaram lacunas no que diz respeito a um parâmetro essencial que é a idade da magnetização.

Levando em conta os diversos contextos geológicos considerados (plutônico, metamórfico, vulcânico, sedimentar) e os processos geodinâmicos envolvidos, bem como na base de novos critérios de qualidade dos dados paleomagnéticos e isotópicos, estamos apresentando, nesse trabalho, um balanço dos estudos paleomagnéticos por ora realizados e as perspectivas para futuras pesquisas neste domínio.

Os resultados disponíveis até o momento permitem uma melhor visão das evoluções paleogeográficas do Escudo das Guianas no período em torno de 2,15-2,05 Ga. Entretanto a diversidade das respostas paleolatitudinais torna necessários estudos complementares tendo em vista o contexto geodinâmico Transamazônico para o qual surge a

questão da mobilidade dos diversos domínios do Escudo das Guianas e das relações mútuas desses domínios.

Referente ao período entre 1,9 e 1,4 Ga, os primeiros resultados paleomagnéticos obtidos para formações plutônicas e sedimentares merecem ser ampliados. Para as numerosas fases de atividade vulcânica que atuaram nesse período, novos dados geocronológicos devem ser acrescentados.

Praticamente nenhum estudo foi realizado até agora para o período entre 1,4 Ga e 200 Ma embora esse intervalo de tempo corresponda a numerosas unidades podendo fornecer informações para o escudo como em todo, devido à relativa estabilidade deste durante o referido período.

No Jurássico, os episódios vulcânicos ligados aos estágios de fraturamento que antecederam a abertura do Oceano Atlântico foram objeto de numerosos estudos que hoje permitem concluir que o escudo ocupava uma posição quase idêntica à atual.

Finalmente, apesar das formações sedimentares pós-jurássicas serem pouco representadas e pouco estudadas, os processos de alteração que afetaram o Escudo das Guianas nessas últimas dezenas de milhões de anos foram objeto de pesquisas recentes que forneceram informações valiosas sobre esses fenômenos e deverão prosseguir nos próximos anos.

Introduction

Le paléomagnétisme a joué un rôle majeur dans l'élaboration et la validation du modèle de la Tectonique des Plaques depuis les premiers travaux de Runcorn (1956) et Irving (1956) en Europe et en Amérique du Nord. Il a alors été clairement démontré que les chemins de dérive apparente des pôles des continents présentaient des similitudes que seule la mobilité des continents pouvait expliquer. Ceci a ensuite permis de conforter l'hypothèse que les chaînes de montagnes du Phanérozoïque étaient essentiellement dues à des processus d'ouvertures et de fermetures successives d'océans. Dès lors, les études paléomagnétiques ont pu être réalisées sur tous les continents, sur des roches de toutes natures et de tous âges. Si les premières études étaient principalement consacrées à des roches potentiellement riches en minéraux magnétiques (basaltes, grès rouges), les progrès technologiques ont permis depuis d'étudier quasiment tous les autres types de roches.

Le Bouclier des Guyanes, au même titre que le socle de l'Afrique de l'Ouest demeure cependant l'une des zones du globe qui n'ont, à ce jour, fait l'objet que de très peu d'études.

Les résultats des études paléomagnétiques y ont toujours été très dépendants de la qualité des études géochronologiques. À l'exception de sa bordure

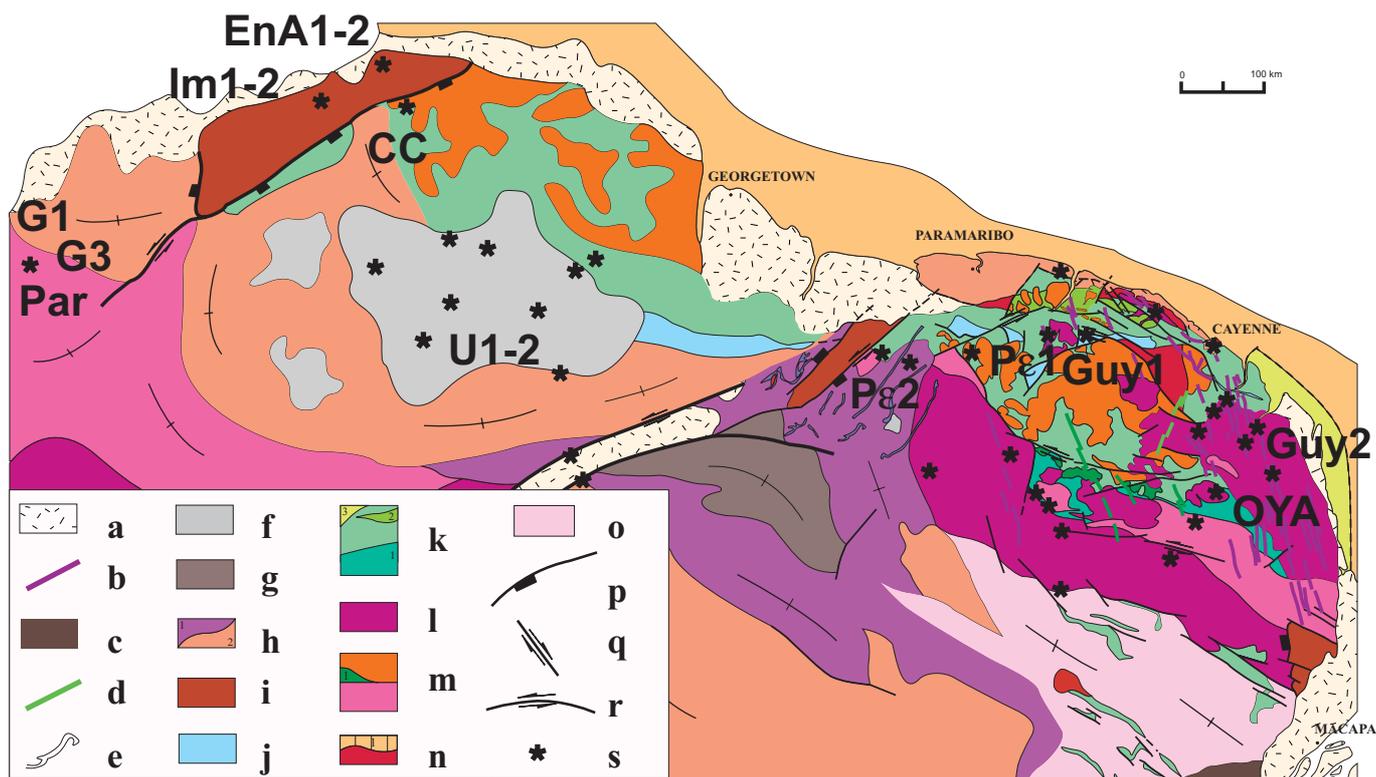


Fig. 1.- Schéma géologique du Bouclier guyanais, d'après Delor *et al.*, 2003.

post-paléoprotérozoïque - a : couverture sédimentaire cénozoïque; b : dolérites mésozoïques, c : couverture nord-amazonienne paléozoïque, d : dolérites néoprotérozoïques, e : dolérites méso- à paléoprotérozoïque, f : grès mésoprotérozoïque du Roraima. Paléoprotérozoïque - g : granulites et migmatites, h : complexe plutonovolcanique Uatumã (1 : granites, 2 : volcanisme acide), i : granulites tardi-transamazoniennes (2,07-2,05 Ga), j : bassins de dépôts détritiques; k : séquences volcano-sédimentaires (1 : conditions métamorphiques de basse pression, 2 : conditions métamorphiques de basse à moyenne pression, 3 : prolongement en mer des séquences volcano-sédimentaires), l : plutonisme granitique, m : plutonisme tonalitique - trondhjémitique - granodioritique méso-transamazonien (1 : gabbro), n : magmatisme de plancher océanique (1 : extension en mer supposée), o : Archéen, p : faille normale, q : cisaillement dextre, r : cisaillement senestre, s : position approximative des sites d'études paléomagnétiques.

Fig. 1.- Geological sketch map of the Guiana Shield (from Delor *et al.*, 2003).

Post-Paleoproterozoic - a: Cenozoic sedimentary cover; b: Mesozoic dolerite; c: Paleozoic North Amazonian cover; d: Neoproterozoic dolerite; e: Meso- to Paleoproterozoic dolerite; f: Roraima mesoproterozoic sandstone. Paleoproterozoic - g: granulite and migmatite; h: Uatumã plutonic-volcanic complex (1: granite, 2: acidic volcanics), i: Late-Transamazonian granulite (2.07-2.05 Ga); j: detrital basins; k: volcanosedimentary sequences (1: low-pressure metamorphic conditions, 2: low- to medium-pressure metamorphic conditions, 3: extension of the volcanosedimentary sequences at sea); l: granite plutons; m: Mesotransamazonian tonalitic - trondhjemitic - granodioritic plutonism (1: gabbro); n: ocean floor magmatic rocks (1: assumed extension at sea); o: Archean; p: normal fault; q: dextral shear; r: sinistral shear; s: approximate position of the paleomagnetic study sites.

méridionale représentée par les séries phanérozoïques du bassin amazonien, l'ensemble du bouclier est constitué par des formations précambriennes azoïques où dominent les termes pluto-métamorphiques. Les seules contraintes sur l'âge de ces séries cristallines se limitent alors aux données isotopiques, parfois anciennes et aux marges d'erreur importantes, et dont la signification n'est pas univoque selon la méthode isotopique utilisée (*i.e.* âge de mise en place ou âge de métamorphisme).

Le bilan actuel des études paléomagnétiques réalisées sur le Bouclier des Guyanes depuis les premiers travaux de Hargraves (1968) est présenté ci-après avec une analyse critique des deux paramètres fondamentaux inhérents à toute interprétation géodynamique : données magnétiques d'une part et âges absolus de ces données d'autre part.

Contexte géologique et potentiel paléomagnétique

Le Bouclier des Guyanes, qui couvre une surface d'environ 1,5 millions de kilomètres carrés, constitue la partie septentrionale du craton amazonien, et s'étend aux territoires du Venezuela, du Guyana, du Surinam, de la Guyane et du Brésil. Les formations précambriennes y sont largement représentées depuis l'Archéen au Mésoprotérozoïque, et témoignent des événements géodynamiques majeurs qui ont abouti à la structuration actuelle du Bouclier des Guyanes (fig. 1). Les formations phanérozoïques, (sédiments et dykes) d'ampleur plus limitée, correspondent aux stades de fragmentation continentale au Paléozoïque (bassin de l'Amazone) et d'ouverture océanique au Mésozoïque (marge atlantique) :

- le socle archéen du Bouclier des Guyanes est identifié sur ses bordures les plus occidentales au Venezuela et orientales en Amapá. Au Venezuela « l'Imataca Complex », long de 450 km et large de 100 km, est limité au sud par la faille de Guri. Ses formations sont considérées d'origine essentiellement ignée, dérivées d'un protolithe archéen entre *ca.* 3,7 Ga et 2,6 Ga (Montgomery and Hurley, 1978 ; Teixeira *et al.*, 1999 ; Tassinari *et al.*, 2000, 2001). En Amapá, les âges Rb-Sr de 2,9 Ga à 2,45 Ga sur des gneiss tonalitiques et enderbitiques (João et Marinho, 1982 ; Montalvão et Tassinari, 1984), ont récemment été confirmés par la systématique Sm-Nd et U-Pb (Sato et Tassinari, 1997 ; Avelar *et al.*, 2003) ;

- entre ces deux limites archéennes, les séries du Paléoprotérozoïque, qui constituent la Province « Maroni-Itacaïunas » (*i.e.* Tassinari *et al.*, 2000) s'étendent sur l'ensemble du bouclier et sont essentiellement constituées de ceintures de roches vertes et de complexes plutoniques (ou granitoïdes) formés lors de l'orogénèse transamazonienne qui constitue l'événement tectono-thermique majeur qui a affecté le bouclier entre 2,2 et 2,0 Ga. Les séries vertes incluent des termes volcaniques (ultramafites, basaltes) et des termes sédimentaires, leur chronologie de détail ayant particulièrement été documentée en Guyane (Delor *et al.*, 2001).

La terminologie régionale de ces séries vertes varie d'un pays à l'autre, « Paramaca » en Guyane, « Marowijne » au Surinam, « Villa Nova » en Amapá, « Barama-Mazaruni » au Guyana, et « Pastora » au Venezuela. Les termes plutoniques qui leur sont associés incluent une large gamme compositionnelle au sein de laquelle peuvent être individualisées deux tendances : 1) tonalitique-granodioritique-tronjhémitique (TTG) et 2) granitique *sensu lato*.

Déjà appréhendée en Guyane depuis le travail de Choubert (1974) sous la terminologie « magmatisme Guyanais » et « magmatisme Caraïbe », cette dualité lithologique a été affinée depuis les 30 dernières années, dans le cadre de modèles géodynamiques en prise avec la tectonique des plaques (Vanderhaghe *et al.*, 1998 ; Delor *et al.*, 2003a et 2003b). Les données isotopiques mettent en évidence, au Paléoprotérozoïque, un recyclage de croûte archéenne et une accretion crustale juvénile par extraction mantellique dès 2,21 Ga.

D'un point de vue structural, les tendances Est-Ouest qui dominant en Amapá et en Guyane, tournent progressivement vers des directions Nord-Sud au Surinam, à proximité du domaine granulitique des Bakhuis daté à 2,07-2,05 Ga (Delor *et al.*, 2003a), et sont rebroussées de nouveau Est-Ouest plus à l'ouest de ce domaine jusqu'au Venezuela (Imataca).

Une suite plutono-volcanique acide connue à l'échelle du Bouclier sous le nom brésilien de « Supergroupe Uatumã », postdate toutes les formations transamazoniennes (1,95-

1,8 Ga). Au Surinam cet ensemble est connu sous le nom de formation Dalbana et comprend des termes volcaniques acides et des termes plutoniques co-génétiques. Ce caractère bi-modal est argumenté plus à l'ouest dans la Province Roraima avec les volcanites « Surumu » et les termes plutoniques « Pedra Pintada », l'ensemble étant daté à *ca.* 1,95 Ga (Fraga *et al.*, 1997).

Les épaisses séquences sédimentaires paléoprotérozoïques du Supergroupe Roraima qui cachettent toutes les formations paléoprotérozoïques incluent tout un ensemble de grès, grès feldspathiques, conglomérats et d'ampélites. Les datations de sills et dykes de roches basiques ainsi que de volcanites pyroclastiques, interstratifiés dans les termes centraux à supérieurs du Roraima, ont jusqu'à présent conclu à un cycle de dépôt remarquablement long, au moins entre 1,9 Ga et 1,6 Ga (Priem *et al.*, 1973, Snelling et McConnell, 1969 ; Teixeira, 1978).

L'évolution thermique de l'épisode transamazonien par les systèmes isotopiques Rb-Sr and K-Ar témoigne d'un passage du bâti guyanais sous les isothermes 500 °C à 300 °C entre 2,08 Ga et 1,76 Ga (Montalvão and Tassinari, 1984 ; Nomade *et al.*, 2002), sans évidence de perturbation thermique postérieure en liaison avec un cycle orogénique. Cependant, des épisodes tectoniques et magmatiques localisés, témoignent d'une réactivation « en contexte continental » du bâti guyanais :

- en Amapá, des intrusions felsiques (Falsino suite) et alcalines (Mapari suite) ont été datées respectivement à *ca.* 1,76 Ga (Lima *et al.*, 1974 ; Montalvão et Tassinari, 1984) et 1,68 Ga – 1,34 Ga (Montalvão and Tassinari, 1984). Des dykes de dolérites datées à *ca.* 1,6-1,8 Ga sont reportés au Surinam (Priem *et al.*, 1973 ; Hebeda *et al.*, 1973 ; Norcross *et al.*, 1998) et au Guyana (Snelling and McConnell, 1969).

Ces dykes ou ces sills du Protérozoïque sont très nombreux au sein du Bouclier des Guyanes. Dans tous les cas, ces intrusions volcaniques sont difficiles, sur le terrain voire en lame mince ou même en géochimie, à distinguer entre elles et aussi de celles du Mésozoïque. La Suite Intrusive du Roraima reste la mieux identifiée au Venezuela et au Guyana où elle domine par rapport à la Suite Intrusive Mineure du Jurassique. Les travaux récents de Santos *et al.* (2002), sur la base de datations U-Pb sur baddeleyite et zircon, sur des dykes et un sill intra Roraima, laissent entrevoir une gamme d'âge de mise en place plus resserrée autour de 1,85-1,90 Ga ;

- au Surinam, un épisode de mylonitisation intense connu sous le nom de « Nickerie event » a été calé globalement vers 1200 ± 100 Ma par le biais des méthodes Rb-Sr et K-Ar sur micas (Priem *et al.*, 1968), et semble confirmé ponctuellement au Sud du Guyana (Snelling et McConnell, 1969) ;

- le dernier événement magmatique majeur est constitué par la mise en place d'essaims doléritiques au Jurassique en relation avec les stades précurseurs de l'ouverture de l'océan Atlantique. Bien que les âges disponibles au Surinam pointent vers une gamme d'âge Trias supérieur-Lias inférieur (Priem *et al.*, 1968), les données les plus récentes obtenues en Guyane pointent plus précisément vers un créneau d'âge clairement Lias inférieur (Deckart *et al.*, 1997 ; Nomade *et al.*, 2000). Ceci est en parfait accord avec les datations obtenues sur les dykes du pourtour Atlantique ou de la CAMP (Central Atlantic Magmatic Province ; Marzoli *et al.*, 1999). Sur le Bouclier des Guyanes, ces dykes sont présents depuis le Venezuela (Minor Intrusive Suite) jusqu'au Brésil (Cassipore) ;

- quelques dépôts sédimentaires du Tertiaire et surtout du Quaternaire soulignent actuellement la limite entre le bouclier et l'océan Atlantique. Ils sont par ailleurs connus en limite ouest du Guyana (Takutu Basin) et témoignent d'une fracturation continentale plus ancienne mésozoïque, probablement contemporaine de l'ouverture de l'océan Atlantique. Enfin, de grands profils d'altération, établis probablement depuis le Jurassique, recouvrent l'ensemble du Bouclier des Guyanes.

L'ensemble de ces formations, qui revêtent une position clef du point de vue de leur situation géographique, et une importance économique du point de vue de leur potentiel minier (Milesi *et al.*, 2003 ; Dardenne et Schobbenhaus, 2003), constitue un terrain de jeu de choix pour des études paléomagnétiques. L'objectif est, à partir de ces données paléomagnétiques, de pouvoir retracer les paléopositions successives du bouclier depuis le Paléoprotérozoïque et ainsi d'établir des corrélations avec les autres cratons d'âge semblable. Les données portant sur les variations latitudinales permettront en particulier d'estimer les quantités de déplacements et/ou de rotations de blocs avec le bouclier amazonien, le craton de São Francisco ainsi qu'avec les cratons africains.

La qualité des données paléomagnétiques

Avant toute utilisation d'une donnée paléomagnétique, il est nécessaire d'en connaître sa validité et donc sa qualité ou la confiance que l'on peut avoir dans les résultats obtenus. Dans le contexte particulier, dominant sur le Bouclier des Guyanes, des roches précambriennes, il est indispensable que le lecteur puisse avoir les moyens d'estimer cette qualité des résultats.

Des critères de qualité ou critères de sélection existent mais ils concernent principalement les données du Phanérozoïque (*e.g.* : Van der Voo, 1990 ; Schmidt *et al.*, 1990). D'autres études de synthèse (*e.g.* : Besse et Courtillot, 1991) présentent des critères de sélection relatifs aux objectifs de précision de la synthèse, tels que la définition

d'un chemin de dérive apparent du pôle. Dans le cas des synthèses sur les données du Précambrien, les données sont généralement reprises sans exclusion, des critères étant souvent inapplicables (*e.g.* : McElhinny et McWilliams, 1977 ; Piper, 1982 ; Idnurm et Giddings, 1988).

Le problème auquel nous sommes généralement confrontés pour le Précambrien est de deux ordres :

- sur le plan de l'étude paléomagnétique, les échantillonnages sont plus délicats (qualité et quantité des affleurements). Les résultats des analyses peuvent être plus complexes (multi-composantes), les tests paléomagnétiques classiques sont difficiles à réaliser (test d'inversion, test du contact de recuit) voire quasi-impossibles à obtenir (test du conglomérat, test du pli) ;

- par ailleurs, la contrainte sur l'âge de l'aimantation est prépondérante mais indépendante de la qualité de l'étude paléomagnétique. Elle est seulement indispensable pour toute utilisation de ces données pour des implications géologiques et géodynamiques. En effet, une étude paléomagnétique ancienne mais de très bonne qualité peut amener des résultats de référence si des contraintes en âge sont apparues depuis. On rejoindra ici la notion de « Key pole » présentée par Idnurm et Giddings (1988) dans leur synthèse sur les données du Précambrien d'Australie.

Il est aussi classiquement reconnu qu'un critère essentiel de qualité des données est que ces données soient publiées, et donc passées par l'acceptation de relecture critique d'une part et accessibles à tout lecteur afin d'être réutilisées ultérieurement en fonction de l'évolution des connaissances (géologique, géochronologique, etc.) sur les objets initialement étudiés.

Les critères n° 1 à 7 proposés par Van der Voo (1990) sont des gages de fiabilité, non exclusifs. Il s'agit probablement du meilleur guide de réflexion pour des sélections sur des données du Phanérozoïque mais ils sont difficilement applicables aux données du Précambrien, où l'âge de mise en place de la roche ne pourra qu'exceptionnellement correspondre à l'âge de l'aimantation (critère n°1). Les tests (critères n° 4 et n° 6) sont plus difficiles à réaliser. Les données sont généralement insuffisantes pour tester les problèmes d'appartenance à un craton stable sans rotations de blocs (critère n° 5) et il convient donc actuellement de supposer qu'il n'y a pas eu de rotations. Enfin, la non-ressemblance avec un paléopôle plus récent (critère n° 7) ne peut quasiment jamais être assurée. Les autres critères (n° 2 et n° 3) liés à l'échantillonnage, aux analyses et aux statistiques sont, eux, des critères purement paléomagnétiques applicables sur toutes les roches et de tous âges.

Les critères tels que ceux de Schmidt *et al.* (1990) sont des critères de sélection qui permettent immédiatement au lecteur de connaître la qualité des résultats avec des codes A

Paleomagnetic classification	Source Référence	Radiometric classification
1) Clear and complete demagnetization procedure 2) Illustration by orthogonal vector diagrams or stereographic plots 3) Clear use of vector subtraction technique (PCA; Kirschvink, 1980) 4) Results fully documented (site location, sampling, statistics) Yes No => "MagE" pole	MagE+ or MagE-	1) Rock age available or estimated (Sedimentary formations) Yes No => "AgeE" pole
5) Adequate sampling (minimum 3 sites and 15 samples) 6) Acceptable statistics ($A95$ or $a95 < 20^\circ$; K or $k > 10$) Yes No => "MagD" pole	MagD+ or MagD-	2) Rock age precision +/- 50 Ma Yes No => "AgeD" pole
7) Large sampling (minimum 6 sites and 30 samples) 8) Moderate to high precision ($A95$ or $a95 < 15^\circ$; K or $k > 15$) Yes No => "MagC" pole	MagC+ or MagC-	3) Rock age precision +/- 25 Ma Magnetic age estimated at +/- 25 Ma Yes No => "AgeC" pole
9) Field tests that constrain, even relatively, the magnetization age 10) Rock magnetism that clearly identify the magnetic carriers Yes No => "MagB" pole	MagB+ or MagB-	4) Magnetic age constrained at +/- 10 Ma Yes No => "AgeB" pole
"MagA" pole	MagA+ or MagA-	"AgeA" pole

Tabl. 1.- Qualité des données paléomagnétiques selon la classification paléomagnétique, la source des références et la classification radiométrique.

Table 1.- Quality of the paleomagnetic data according to the paleomagnetic classification, the reference source and the radiometric classification.

(très bons résultats) à D (résultats quasiment inutilisables). Cependant l'absence ou la faible contrainte sur l'âge des formations peut très bien, pour des résultats paléomagnétiques de très bonne qualité, donner une image faussée de l'étude avec probablement un classement immédiat en catégorie C.

Nous proposons ici (tabl. 1 et ann.) des critères de qualité prenant en compte le fait que :

- ces données aient été publiées après validation ;
- ces données passent des critères spécifiques à leur étude paléomagnétique ;
- les contraintes radiométriques aient été clairement établies.

Dix critères paléomagnétiques (tabl. 1 et ann.) qui semblent indispensables pour une classification des données paléomagnétiques pour le Précambrien sont proposés. Cette classification pourrait être aussi appliquée aux données du Phanérozoïque même si la contrainte en âge n'apparaît pas à ce stade alors qu'il s'agit généralement de la contrainte initiale minimum pour les études paléomagnétiques des roches du Phanérozoïque.

Une classification radiométrique des données paléomagnétiques est aussi présentée pour permettre une utilisation de toutes les données obtenues sur tout type de roche à la seule condition que l'âge magnétique puisse être au minimum contraint. Cet âge magnétique pourra être celui du refroidissement pour une roche plutonique ou volcanique, celui d'un rajeunissement/réaimantation pour une roche métamorphique et probablement un âge d'acquisition d'aimantation rémanente détritique ou chimique pour une formation sédimentaire azoïque. Dans tous les cas, il sera important d'indiquer les âges magnétiques et les âges des roches car ils diffèrent très fréquemment les uns des autres et ne s'adressent pas nécessairement aux mêmes spécialistes.

À partir de cette classification, il apparaît raisonnable d'envisager dans un futur proche que les études paléomagnétiques seront entreprises conjointement avec des études radiométriques multi-méthodes. Ainsi une utilisation des données paléomagnétiques très fiables, les « key poles », sera possible pour étudier les chemins de dérive apparents des pôles, les évolutions paléogéographiques et mieux comprendre les évolutions géodynamiques des boucliers continentaux anciens.

POLE	Formation/pôle	N	n	Lat (°S) pole	Long (°E) pole	k	A95 (dp/dm)	Critères de qualité/confiance		
								QV	QSPLT	QTD
OYA	Oyapock-tonalite	5	30	28	346	60	13,8	5	B	MagB+AgeA
Im1	Imataca-pole I	9	?	49	18	34	9	2	D	MagE-AgeD
Im2	Imataca-pole II	4	?	29	21	48	13	2	D	MagE-AgeD
EnA1	Encrucijada	5	20	55	8	150	6	4	B-	MagC+AgeB
EnA2	Encrucijada	3	9	37	36	40	18	4	B-	MaD+AgeB
CC	Cuchivero-Caicara	6	?	69	70	10	22	2	D	MagE-AgeE
Guy1	granites and metasediments	15	66	62	61	18	10	7	B	MagA-AgeB
Guy2	granitoids	5	26	5	50	26	18	7	B-	MaC-AgeB
RS	Roraima sandstone	3	?	69	347	27	24	2	C	MagE-AgeD
U2	Uairen Formation	6	35	65	2,3	7	27	2	C	MagD+AgeD
U1	Uairen Formation	22	126	69.7	17,5	16	8,1	4	C	MagB+AgeD
P _s 1	Blakawatra dykes	2	17	44	30	25*	7*	3	B-	MagD+AgeC
P _s 2	Kabalebo dykes	2	30	8	53	95*	3*	3	B-	MagC+AgeC
Group I	Roraima dolerites	7	34	63	51	47	9	3	C	MagE+AgeE
Group II	Roraima dolerites	7	35	45	347	40	10	3	C	MagE+AgeE
Par	Parguaza	2	?	67	26	407	13	3	C	MagE-AgeC
G1	Parguaza	3	20	54.5	156,3	15	6.3/12.0	4	B-	MagC+AgeC
G3N	Parguaza	3	15	-10.7	294,5	10	25.8/25.9	5	B-	MagC+AgeC
G3R	Parguaza	3	7	-3.0	300,5	6	53.2/53.6	4	C	MagD+AgeC
Group III	Minor dyke suite	4	21	73	191	53	13	2	C	MagE+AgeB
PTri	"Permo-Triassic" dolerites	10	90	82	320	25	10	4	B	MagB+AgeB
Bol	Bolivar Dikes	5	41	66.9	245.6	246	2.6/5.0	5	C	MagE+AgeA
Gua	Guacamayas volcanics	5	24	70.5	300.7	17	10.5/20.1	4	C	MagE+AgeA
Gd	Guyana dykes	7	52	63	222	25	12.4	3	C	MagE+AgeB
A	French Guyana dolerites	8	50	73.2	195.3	289	3.4	5	A	MagA+AgeA
B	French Guyana dolerites	18	134	81.6	269.1	70	4.2	5	A	MagA+AgeA
JID	Jurassic Intrusive dolerites	63	403	79.8	256.2	24	3.7	5	A	MagA-AgeA

Tabl. 2.- Pôles paléomagnétiques du Bouclier des Guyanes. POLE : acronyme utilisé pour cette synthèse ; Formation/pôle : indications de l'étude d'origine ; N, n : Nombre de sites et d'échantillons ; Lat, Long : latitude et longitude des pôles ; k, A95 (dp/dm) : paramètre de précision et erreur autour du pôle moyen ; Critères de qualité/confiance, QV selon Van der Voo (1990), QSPLT selon Schmidt *et al.* (1990) et QTD étude présente.

Table 2.- Paleomagnetic poles of the Guiana Shield. POLE: acronym used for this synthesis; Formation/pôle: indications of the original study; N, n°: Site number and sample number; Lat, Long: latitude and longitude of the poles; k, A95 (dp/dm): parameter of precision and error around the average pole; Quality/confidence criteria, QV according to Van der Voo (1990), QSPLT according to Schmidt *et al.* (1990) and QTD from the present study.

Le socle de l'Archéen au Paléoprotérozoïque moyen (Rhyacien 2300-2050 Ma)

Les roches les plus anciennes du Bouclier des Guyanes sont les séries archéennes du complexe d'Imataca au Venezuela. Deux pôles ont été obtenus sur ces formations lors de la première étude paléomagnétique réalisée sur les roches du socle (Onstott et Hargraves, 1981).

La problématique des âges de roches et des aimantations par analyse isotopique prend ici toute son importance car si le protolithe des séries, voire un premier métamorphisme granulitique, est considéré comme Archéen (Tassinari *et al.*, 2001), l'âge de l'aimantation est lui probablement beaucoup plus jeune et associé à la phase de réactivation thermotectonique de haute température (*pro parte* granulitisation) datée grossièrement vers 2050 Ma par les méthodes Rb-Sr sur biotite et U-Pb sur zircon (Montgomery et Hurley, 1978).

L'âge de la roche reste donc trop imprécis pour bien contraindre l'âge de l'aimantation. En outre, cette étude présente des résultats paléomagnétiques qui sont insuffisamment détaillés. En effet, la localisation des sites n'est pas indiquée, si le nombre de sites est donné, le nombre d'échantillons prélevés est manquant. De plus il est indiqué dans le tableau des données que ces données n'ont pas été "structurally corrected" alors que les résultats statistiques, même sans test du pli positif, semblaient s'améliorer. On notera aussi que les désaimantations ne semblent pas complètes et surtout que les détails prévus dans une publication postérieure citée en référence ne sont pas disponibles.

Ces résultats sont donc de faible qualité, quels que soient les critères utilisés (fig. 2, tabl. 2, pôles Im1 et Im2) et ne peuvent qu'être pris à titre indicatif avec nécessité d'être repris par des échantillonnages complémentaires associés à des datations plus adaptées pour contraindre l'âge de l'aimantation.

Un autre pôle a été obtenu dans le cadre de cette étude (fig. 2, tabl. 2, pôle CC) sur des métavolcanites mais avec

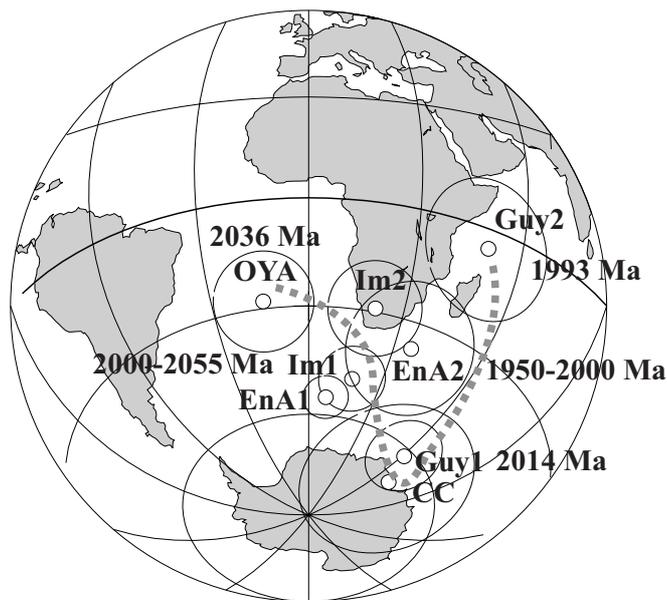


Fig. 2.- Représentation des pôles paléomagnétiques obtenus sur les séries du Paléoprotérozoïque du Bouclier des Guyanes, références dans le texte et le tableau 2. Les âges indiqués sont les âges magnétiques estimés par Nomade *et al.* (soumis).

Fig. 2.- Plot of the paleomagnetic poles obtained on the Paleoproterozoic series of the Guiana Shield; references in the text and Table 2. The indicated ages are the ages estimated by Nomade *et al.* (submitted).

tout aussi peu de précisions sur les résultats paléomagnétiques et les contraintes géochronologiques.

L'étude suivante (Onstott *et al.*, 1984), réalisée au Venezuela, présente des résultats (fig. 2, tabl. 2, pôles EnA1 et EnA2) obtenus à partir d'un granite monzonitique initialement daté par Rb-Sr (roche totale et sur biotite) mais aussi daté dans le cas de cette étude par la méthode Ar-Ar sur amphibole et sur biotite.

Il s'agit donc bien ici du cas idéal d'étude paléomagnétique effectuée sur le Précambrien avec couplage *in situ* des approches paléomagnétique et géochronologique.

L'échantillonnage est cependant plutôt restreint et les informations sur les sites manquantes, ce qui réduit les critères paléomagnétiques alors que ces résultats pourraient être considérés comme acceptables voire fiables.

Les auteurs présentent les deux directions EnA1 et EnA2 comme étant acquises à des périodes différentes de par leur polarité magnétique opposée.

Il n'est cependant pas possible d'établir une chronologie relative entre ces deux aimantations de par les températures de blocage similaires observées et parfois aussi la bipolarité présente sur certains échantillons.

Une moyenne générale, impossible à calculer d'après le peu d'informations données, serait peut être plus

représentative d'un signal acquis probablement sur une durée assez longue pour avoir enregistré des inversions du champ magnétique terrestre.

Ces deux pôles étant finalement proches l'un de l'autre et plutôt bien contraints en âge magnétique, ils pourraient être considérés comme des "key poles".

Deux études récentes (Nomade *et al.*, 2001 ; Nomade *et al.*, soumis) présentent des résultats très importants et novateurs acquis, dans le cadre d'un travail de thèse (Nomade, 2001), au cours d'un vaste programme pluridisciplinaire de cartographie géologique en Guyane française (Delor *et al.*, 2001), pour lequel des investigations paléomagnétiques ont été très importantes. En effet, près de 200 sites et plus d'un millier d'échantillons ont été prélevés sur des roches du Protérozoïque (Théveniaut *et al.*, in prep.) mais aussi sur des dykes du Protérozoïque et du Jurassique inférieur (discutés par ailleurs). Les résultats de ces deux études ont été obtenus le long du fleuve Oyapock, à la frontière franco-brésilienne mais aussi dans des formations méta-sédimentaires du Nord-Ouest de la Guyane.

Le pôle OYA (fig. 2, tabl. 2, Nomade *et al.*, 2001) est très bien contraint en âge par une double datation Ar-Ar sur amphibole et sur biotite qui a permis d'en déduire un âge magnétique comme pour l'étude d'Onstott *et al.* (1984). L'échantillonnage est certes restreint (5 sites, 30 échantillons) mais toutes les informations nécessaires à la définition de critères de qualité sont présentes. La localisation des sites y est indiquée, les traitements paléomagnétiques sont illustrés, des descriptions de la minéralogie magnétique sont détaillées et enfin, des datations géochronologiques permettent donc de connaître l'âge de l'aimantation caractérisée. L'âge magnétique de ce pôle est estimé à 2036 ± 14 Ma d'après un calcul de la vitesse de refroidissement de la tonalite étudiée ($4,8 + 2,6/-2,1$ °C/Ma). Cet âge est déduit de ceux sur amphibole et biotite de cette roche par la méthode Ar-Ar mais aussi des autres âges (Pb-Pb, Rb-Sr,...) disponibles sur la Guyane française. La qualité, quels que soient les critères utilisés (tabl. 2, pôle OYA), est donc très bonne. En revanche, ce résultat met en lumière que le pôle obtenu doit impérativement être présenté avec les différents âges obtenus pour pouvoir servir ultérieurement à des comparaisons avec d'autres formations dont les vitesses de refroidissement pourront être éventuellement différentes.

En effet, ce résultat est typique de ce qui a pu être décrit dans l'introduction sur les problèmes d'âges. Cette roche a été datée par la méthode Pb-Pb sur zircons vers 2090 Ma (Delor *et al.*, 2001) alors que l'âge magnétique moyen calculé à 2036 ± 14 Ma ne correspond à aucun âge connu de roche en Guyane.

Si cette roche n'a pas été affectée par des événements thermiques postérieurs, l'âge Pb-Pb de la cristallisation des

zircons pourra être utilisé pour les comparaisons avec d'autres objets géologiques semblables. Les âges Ar-Ar sur amphibole pourront être considérés, compte tenu de leur température de fermeture proche de celle de blocage de la magnétite, comme les plus proches de l'âge de l'aimantation. Les âges Ar-Ar sur biotite, à cause de température de fermeture significativement plus basse vers 250-300°C, devront être en revanche utilisés avec précaution, pour ne fournir qu'une approximation de la vitesse de refroidissement. Enfin, l'âge magnétique doit être considéré comme un âge relatif ou déduit des autres âges mais dont le seul intérêt est de pouvoir ultérieurement faciliter des comparaisons avec d'autres données paléomagnétiques aux contraintes semblables.

Deux autres pôles (fig. 2, tabl. 2, pôles Guy1 et Guy2, Nomade *et al.*, soumis) ont été acquis dans le cadre de cette première étude en Guyane française. L'approche est très semblable à celle de l'étude initiale. Tous les détails paléomagnétiques sont présents, des tests sont indiqués. Bien que seul un âge Ar-Ar sur biotite soit attribuable à un granite à l'origine de la réaimantation mesurée sur les roches métasédimentaires, une estimation des âges magnétiques est proposée en tenant compte des âges connus sur cette zone (Delor *et al.*, 2001).

Les auteurs en déduisent un probable chemin de dérive apparente du pôle (CDAP) entre 2,04 et 1,99 Ga en reliant les pôles successifs en âge que sont OYA (2036 ± 14 Ma), Im1 et Im2 (2055-2000 Ma), EnA1 et EnA2 (2000-1950 Ma), Guy1 (2014 ± 27 Ma) et Guy2 (1993 ± 25 Ma). Ce CDAP apparaît donc comme une première base de réflexion que seules de nouvelles données permettront de préciser.

L'ensemble des résultats concernant le Protérozoïque de Guyane française (Théveniaut *et al.*, in prep.) est actuellement en attente de datations radiométriques qui permettront de s'approcher au mieux des problématiques sur les âges magnétiques. Cependant ils concernent plus de 100 sites et plus de 700 échantillons et s'étendent sur une période, d'âge des roches concernées (méthode Pb-Pb sur zircons), de près de 100 Ma.

Ces résultats sont donc discutés ci-après mais, afin de maintenir une logique sur les critères de qualité des données paléomagnétiques, les détails sur les positions des pôles et résultats statistiques etc. ne sont pas donnés dans le tableau 2 afin que ces données ne puissent être véritablement utilisables que lorsqu'elles seront publiées et donc validées.

On peut cependant indiquer que ces données seront, une fois validées, de qualité quasi maximale avec le nombre de sites et d'échantillons, les détails sur les analyses et résultats, des tests de contacts de recuit, la présence d'inversion etc.

Tous les pôles obtenus dans cette étude l'ont été sur des granites, des gabbros/tonalites et des roches

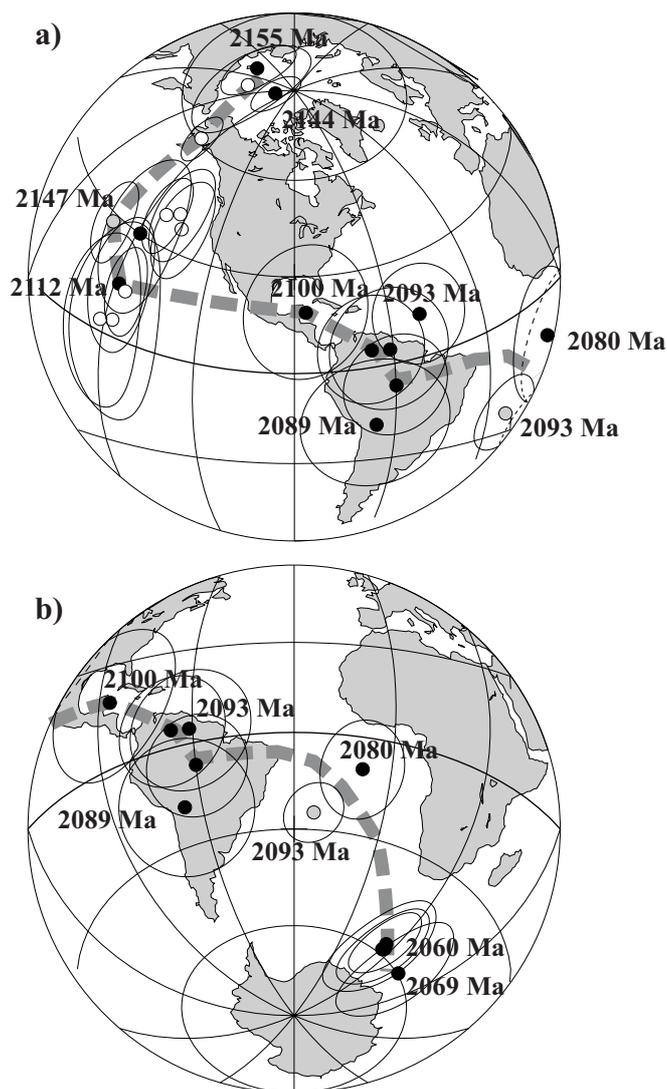


Fig. 3.- Représentation des pôles paléomagnétiques obtenus sur les séries du Paléoproterozoïque de Guyane Française (Théveniaut *et al.*, in prep.). Les âges indiqués sont les âges des roches (méthode Pb-Pb sur monozircons). 3a) période 2155-2080 Ma ; 3b) période 2100-2060 Ma.

Fig. 3.- Plot of the paleomagnetic poles obtained on the Paleoproterozoic series of the Guiana Shield (Théveniaut *et al.*, in prep.). The indicated ages are the rock ages (Pb-Pb on single zircons). 3a) 2155-2080 Ma period; 3b) 2100-2060 Ma period.

métamorphiques de différentes régions de la Guyane. Ils sont présentés sur la figure 3 et en fonction des âges des roches uniquement (Delor *et al.*, 2001 ; méthode Pb-Pb sur zircons). Ils permettent de proposer un chemin de dérive apparente du pôle qui couvre la période de 2160 Ma à 2060 Ma et établi uniquement à partir des résultats des roches plutoniques. Les résultats dérivés des séries métamorphiques ont ensuite été superposés et il apparaît alors deux points importants qui sont 1) tous ces pôles tombent sur le CDAP ; 2) ils ne tombent que sur la partie ancienne (2160-2110 Ma) de la courbe. Ceci montre que la grande phase plutonique majeure vers 2100 Ma n'a pas contribué à réaimanter les autres roches dont celles déjà métamorphisées antérieurement.



Fig. 4.- Représentation des pôles paléomagnétiques publiés du Paléoprotérozoïque (fig. 2) avec le possible CDAP de la période potentiellement équivalente (fig. 3b) de Théveniaut *et al.* (in prep.).

Fig. 4.- Plot of the published Paleoproterozoic paleomagnetic poles (Fig. 2) with the possible CDAP of the potentially equivalent period (Fig. 3b) from Théveniaut *et al.* (in prep.).

Sur le CDAP ainsi présenté (fig. 3), il apparaît aussi que le pôle magnétique est presque passé d'un pôle géographique à l'autre au cours de ces 100 Ma. En l'état actuel, cela impliquerait une vitesse de dérive du bouclier (continent) de l'ordre de 10-15 cm/an. Ce résultat devra être précisé par de meilleures contraintes sur l'âge magnétique et n'est donc donné ici qu'à titre indicatif. Ces résultats, très prometteurs vont dans un premier temps devoir être validés mais ils devraient pouvoir ensuite servir de base à l'établissement d'un CDAP bien calibré en âge et utilisable pour établir des comparaisons avec les autres cratons du globe et tester les hypothèses d'assemblages continentaux au Protérozoïque inférieur.

Sur la figure 4, nous avons représenté tous les pôles actuellement validés ou en cours de validation et donnés dans le tableau 2 ainsi que le CDAP que nous venons de discuter ci-dessus. Ces pôles apparaissent sur la partie récente du CDAP et pourraient prolonger dans le temps l'évolution de ce CDAP.

On indiquera par exemple que le pôle OYA est très proche d'un pôle obtenu sur un gabbro, donc de nature pétrographique semblable, et dont l'âge Pb-Pb sur zircon et potentiellement l'âge magnétique devraient être semblables. Les autres pôles (Im1, Im2, EnA1, EnA2 et Guy1) se placent tous sur le CDAP à l'exception du pôle Guy2 considéré comme étant plus jeune même si les âges Pb-Pb de la région de prélèvement ne semblent pas tout à fait en accord avec cette interprétation. Ce dernier point est

cependant à discuter et expliquer sur la base de datations précises et donc d'âges magnétiques contraints, ce qui n'est pas le cas actuellement.

Il faut aussi noter qu'au stade actuel, rien n'indique que les pôles semblables obtenus sur des formations plus récentes du Bouclier des Guyanes (cf. paragraphes suivants) correspondent à de possibles réaimantations. Ceci est étayé par le fait que ces formations plus récentes sont absentes en Guyane française où l'essentiel de ce CDAP a été défini et d'autre part par le fait que des tests indiquent l'absence de réaimantation.

En conclusion sur cette partie du Paléoprotérozoïque, on indiquera cependant que les études en cours (Nomade *et al.*, soumis ; Théveniaut *et al.*, en préparation) basées sur des échantillonnages conséquents (sites et échantillons), des caractérisations de la minéralogie magnétique, des tests paléomagnétiques (test du contact de recuit et test d'inversion) et surtout des contraintes géochronologiques multi-méthode (Ar-Ar sur biotite et/ou amphibole, Pb-Pb sur zircon) montrent que des résultats de bonne qualité, comme ceux publiés récemment (Nomade *et al.*, 2001) peuvent être produits sur des roches très anciennes.

S'il est clair que ces études vont apporter des renseignements plus précis sur l'évolution géodynamique vers 2,1 Ga, il reste encore à décrypter, l'évolution géodynamique précoce des formations paléoprotérozoïques (Rhyacien: 2,2-2,1 Ga), et leur évolution géodynamique tardive (Orosirien : 2,05-1,8 Ga). En effet, si tous les travaux modernes s'accordent à envisager vers 2,1 Ga un contexte collisionnel de domaines paléoprotérozoïques juvéniles dans un régime transcurrent, l'histoire précoce (2,2-2,1 Ga) de ces domaines reste encore largement débattue : diapirisme, ouverture océanique de faible ou large amplitude, etc. L'étude des domaines précoces de type TTG (fig. 1) datés à 2,2-2,15 Ga et non re-équilibrés vers 2,1 Ga (exemple possible du secteur centre Guyane), permettra à terme de discuter l'histoire de ces blocs juvéniles, et notamment leur mobilité relative les uns par rapport aux autres à l'intérieur du domaine transamazonien, mais aussi à l'échelle transatlantique, ce qui permettrait d'en déduire les « vergences géodynamiques » et leur amplitude, donc d'apporter des arguments étayant les processus géodynamiques envisagés.

Les formations sédimentaires fini-paléoprotérozoïque (1,8-1,6 Ga : Statherien) à mésoprotérozoïque précoce (1,6-1,4 Ga : Calymnien)

Deux études (Onstott et Hargraves, 1981 ; Castillo et Costanzo-Alvarez, 1993) concernent les sédiments de la formation du Roraima. La première approche paléomagnétique (Onstott et Hargraves, 1981) ne fait mention que de

peu de détails avec seulement comme information un faible nombre de sites (3), une erreur importante sur la moyenne ($A95 = 24^\circ$) et la position du pôle moyen obtenu (fig. 5, tabl. 2, pôle RS). Il est mentionné dans le texte que l'âge de l'aimantation est mal contraint et qu'il pourrait s'agir d'une aimantation secondaire liée à de l'altération hydrothermale. Ce résultat est donc de très faible qualité/confiance (tabl. 2) quel que soit le type de critère utilisé.

L'étude plus récente de Castillo et Costanzo-Alvarez (1993) est quant à elle beaucoup plus détaillée. La position précise des sites n'est pas fournie mais leur situation peut être estimée grâce à une carte de localisation. Le nombre de sites est plus important (22) et surtout les traitements paléomagnétiques sont détaillés et illustrés avec, de plus, des caractérisations de la minéralogie magnétique par des analyses de magnétisme des roches et l'étude de lames minces. Si les auteurs reconnaissent la possibilité d'avoir caractérisé des directions d'aimantations qui ont pu être affectées par des phénomènes hydrothermaux, ils indiquent aussi que le faible degré de métamorphisme et surtout l'absence d'intrusions de basaltes (Suite Intrusive du Roraima) plaident en faveur d'aimantation détritiques à faiblement post-détritiques. En fonction du porteur (magnétite et/ou hématite) et de la taille des grains de magnétite, ils en déduisent une chronologie relative des aimantations caractérisées. De par le nombre des échantillons, les deux pôles (fig. 5, tabl. 2, pôles U1 et U2) divergent en qualité (tabl. 2) avec toutefois un pôle U1 de bonne facture (MagB). Comme il est clairement établi (cf. Contexte géologique) que ces formations sédimentaires azoïques ont pu se déposer sur une très longue période de l'ordre de 300 Ma, l'âge précis de ces pôles reste très difficile à contraindre (AgeD).

Sur la figure 5, les pôles U1 et U2 que nous figurons sont ceux issus des résultats de cette étude. Le pôle U1 a été recalculé à partir des données de polarité normale (U1N) et inverse (U1R) de l'article. Il s'agit pour les auteurs d'une aimantation thermochimique post-dépositionnelle. Le pôle U2 est considéré comme caractéristique d'une aimantation rémanente détritique primaire.

Le pôle, même indicatif, de Onstott et Hargraves (1981; fig. 3, pôle RS) est très semblable aux deux pôles U1 et U2. Ainsi, même si ces trois pôles sont peu différents de ceux de la Suite Intrusive du Roraima (Cf. chapitre « Dykes et sills méso-protérozoïque »), ils peuvent néanmoins être considérés comme représentatifs de la formation sédimentaire du Roraima avec un âge qui reste toutefois mal défini entre 1960 Ma et 1580 Ma.

Bien évidemment, cette considération demande à être confirmée par des études plus détaillées avec notamment des tests paléomagnétiques sur des contacts de recuits avec les diabases intrusives dans ces formations, qu'elles soient du Protérozoïque (Suite Intrusive du Roraima) ou du Jurassique

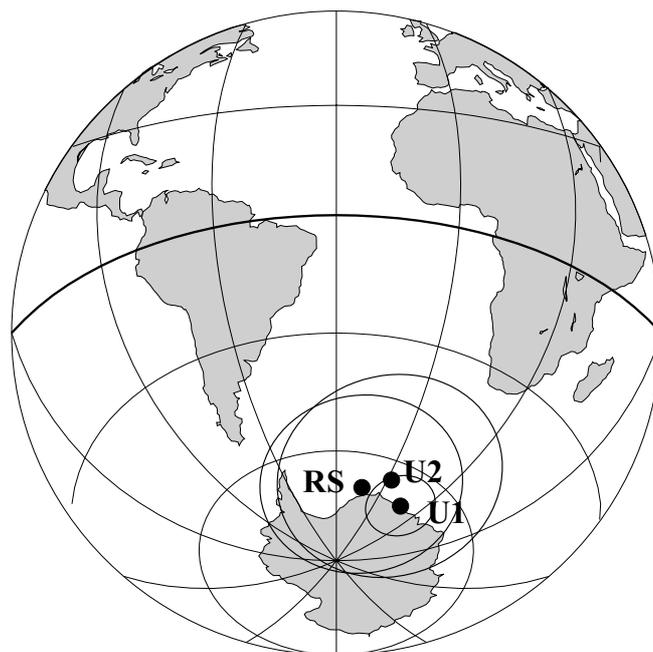


Fig. 5.- Représentation des pôles paléomagnétiques obtenus sur les formations sédimentaires protérozoïques du Roraima, références dans le texte et le tableau 2.

Fig. 5.- Plot of the paleomagnetic poles obtained on the Proterozoic sedimentary formations of Roraima; references in the text and Table 2.

(Suite Intrusive Mineure). La formation sédimentaire du Roraima, constituée par l'accumulation d'une pile sédimentaire de plus de 1800 m, est une cible idéale pour établir des références magnétostratigraphiques ou tout du moins essayer d'analyser l'évolution paléogéographique de cette région du Bouclier des Guyanes lors de la longue période de dépôt de cette formation.

Les dykes et les sills fini-paléoprotérozoïque (1,8-1,6 Ga : Stathérien) à mésoprotérozoïque précoce (1,6-1,4 Ga : Calymnien)

La première étude paléomagnétique réalisée sur le Bouclier des Guyanes (Hargraves, 1968) concernait des dykes et des sills du Mésoprotérozoïque. Tout ce qui pouvait être fait dans le cadre d'étude paléomagnétique à cette époque y est présent. La localisation, le nombre de sites et d'échantillons, les détails sur les traitements adoptés ainsi qu'une caractérisation de la minéralogie magnétique présente. Cependant ces traitements n'étaient pas complets et il s'agissait de la première référence paléomagnétique sur le bouclier.

De plus, dans cette étude, le volet géochronologie présente une certaine faiblesse vis-à-vis de l'étude magnétique. En effet, la datation des essais filoniens a été généralisée à partir de la datation d'un des filons les

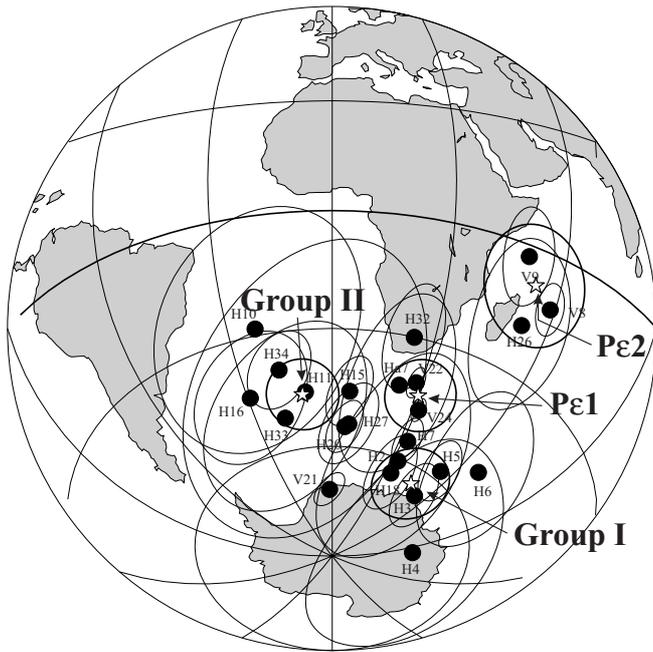


Fig. 6.- Représentation des pôles obtenus sur les intrusions volcaniques (dykes et sills) du Protérozoïque du Bouclier des Guyanes, références dans le texte et le tableau 2.

Fig. 6.- Plot of the paleomagnetic poles obtained on the Proterozoic volcanic intrusions (dikes and sills) of the Guiana Shield; references in the text and Table 2.

composant. La datation d'un dyke ou d'un sill n'implique pas que tous les autres dykes ou sills aient nécessairement le même âge. De plus, les méthodes (K-Ar et Rb-Sr sur roche totale) utilisées pour dater ces roches, méthodes dont la fiabilité intrinsèque n'est pas remise en question, ne permettent pas d'apprécier si d'éventuelles perturbations thermiques ne sont pas venues rouvrir, même partiellement, le système après la mise en place des filons. L'étude paléomagnétique met en évidence deux groupes de directions (fig. 6, tabl. 2 : pôles Group I et Group II) sans que les datations géochronologiques n'aient pu mettre en évidence l'existence de deux phases distinctes d'émission.

L'étude de Veldkamp *et al.* (1971), au Surinam, apporte d'autres résultats qui révèlent aussi deux groupes de directions (fig. 6, tabl. 2 : pôles Pe1 ou Blakawatra et Pe2 ou Kabalebo) pour lesquels sont suggérés des âges respectivement vers 1750 Ma et vers 1600 ± 50 Ma. L'étude la plus récente (Hargraves, 1978), sur des dykes dits du Permo-Trias (cf. Chapitre Dykes du Mésozoïque) a montré trois pôles différents de ceux supposés du Permo-Trias. La différence de paléoposition de ces trois pôles n'a pas permis de calculer un pôle moyen qui n'aurait été que de très faible qualité.

Tous les pôles des sites (VGP, Virtual Geomagnetic Pole) des trois études mentionnées ci-dessus ont été représentés sur la figure 6. Les pôles moyens des deux premières études indiqués dans le tableau 2, sont aussi représentés. Le pôle Pe1 (daté vers 1750 Ma) apparaît très

différent des autres groupes de pôles pour lesquels une dispersion assez importante ne permet pas, en l'état actuel de postuler sur des polyphasages d'émissions volcaniques ou une composante importante de variation séculaire. Le seul âge disponible indique une émission vers 1600 ± 50 Ma pour le pôle Pe2.

On peut regretter que les études sur ces formations volcaniques intrusives ne puissent être actuellement mieux contraintes. En effet, avec 23 sites, 148 échantillons, il s'agit des formations les plus étudiées du Protérozoïque du Bouclier des Guyanes. Cependant ce problème paléomagnétique est aussi important sur l'aspect géologique de ces différentes phases intrusives potentielles car de nombreux âges ont pu être obtenus entre 1800 Ma (Deckart, 1996) et le Jurassique (cf. chapitre Dykes et sills mésozoïques).

Les données paléomagnétiques et isotopiques disponibles pour les dykes protérozoïques sont donc encore trop fragmentaires pour contribuer efficacement au débat sur l'évolution du Bouclier Guyanais après 2 Ga.

Le challenge pour les études à venir est double :

- sur le plan méthodologique, il conviendra d'utiliser les méthodes de datation les plus précises possibles (à $\pm 5-10$ millions d'années), pour mieux contraindre les phases volcaniques et leurs implications géodynamiques pour l'évolution du Bouclier des Guyanes. Le couplage d'une étude paléomagnétique avec la méthode Ar-Ar sur des minéraux non affectés par des phénomènes d'altération, apparaît l'objectif à atteindre. Plus difficile à mettre en œuvre mais gage de qualité sur l'âge des magmas, la recherche et l'analyse isotopique de minéraux de plus haute température telle que la baddeleyite est aussi envisageable. Elle a été tentée avec succès par Norcross *et al.* (1998) au Guyana et par Santos *et al.* (2002) à l'échelle du craton amazonien.

- sur le plan évènementiel, le Bouclier guyanais est resté « orogéniquement stable », après 1,5 Ga, contrairement à ses prolongements sud-ouest, témoins d'accrétions successives jusqu'à 1,1 Ga (Tassinari *et al.*, 2001). Les dykes représentent donc les seuls objets géologiques permettant une étude paléomagnétique et isotopique, pour la période post 1,5 Ga. On retiendra ici la perspective d'étudier les générations récemment mises en évidence à 1,5 Ga au Surinam (de Roever *et al.*, 2001, 2002) et à 800 Ma en Guyane (Delor *et al.*, 2001).

Par ailleurs il serait souhaitable de « tester » la réponse des dykes tardi-transamazoniens de Guyane supposés à 1,8 Ga. Les réponses qu'ils pourraient apporter, en termes isotopiques, et de par leur géométrie N030 bien réglés, contribueraient à contraindre l'histoire finie-transamazonienne du Bouclier des Guyanes, apportant par la même occasion des informations intermédiaires avec celles des formations du Uatumã.

Les formations plutoniques du Mésoprotérozoïque précoce (1,6-1,4 Ga : Calymnien)

Le batholite de Parguaza (ou Parguaza Igneous Complex) est situé au Venezuela, à l'ouest du complexe archéen d'Imataca et au sud du fleuve Orénoque. Constitué de granites, de granodiorite et de rhyodacites, il semble correspondre à la mise en place des magmas les plus récents du Bouclier des Guyanes. Quelques résultats paléomagnétiques sont disponibles pour cet ensemble, avec plus ou moins de détails, comme pour les formations sédimentaires du Roraima décrites précédemment. Un pôle indicatif (fig. 7, tabl. 2, pôle Par) a été obtenu par Onstott et Hargraves (1981) sur deux sites non localisés, sans indication sur le nombre d'échantillons et l'efficacité des traitements paléomagnétiques. Ce pôle est donc de très faible qualité (tabl. 2).

Une seconde étude plus récente (Miron-Valdespino et Costanzo-Alvarez, 1997) présente des résultats plus détaillés. Le nombre d'échantillons est important (46 pour six sites), les contraintes géochronologiques et les détails, notamment sur la caractérisation magnétique et les traitements paléomagnétiques, sont de bonne qualité. Trois directions ont été identifiées dont deux sont antipodales. Les pôles obtenus (fig. 7, tabl. 2, pôles G3N, G3R et G1) sont de deux types distincts. Les directions antipodales G3 et G3R ont fourni des pôles très semblables et localisés sur le Bouclier des Guyanes tandis que la direction G1 a fourni un pôle très différent mais semblable à celui de l'étude initiale de ce granite (fig. 7, pôle Par, Onstott et Hargraves, 1981). Les contraintes géochronologiques à partir de datation U-Pb sur zircons et Rb-Sr (âges modèles) combinés avec les résultats paléomagnétiques et notamment la caractérisation de la minéralogie magnétique présente permettent d'estimer :

- l'âge du couple G3-G3R entre 1400 Ma et 1480 Ma ;
- l'âge du pôle G1 possiblement par extension du pôle Par entre 1260 Ma et 1360 Ma.

Ces résultats peuvent donc être considérés comme fiables et représentatifs du signal paléomagnétique du Bouclier des Guyanes à cette époque. Même s'il eut été souhaitable que ces résultats soient basés sur un nombre plus conséquent de sites et d'échantillons, on peut considérer ces deux couples de pôles comme des "key pole" pour le Bouclier des Guyanes.

De la fin du Mésoprotérozoïque au Paléozoïque

Aucune donnée ne couvre actuellement cette période, cependant la possibilité de réaliser quelques études

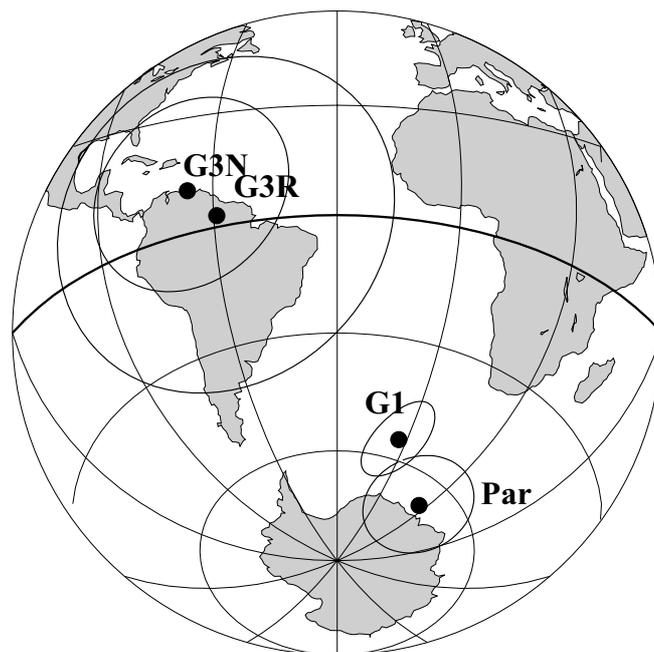


Fig. 7.- Représentation des pôles paléomagnétiques obtenus sur le granite Eo-mésoprotérozoïque de Parguaza, références dans le texte et le tableau 2.

Fig. 7.- Plot of the paleomagnetic poles obtained on the Eo-Mesoproterozoic Parguaza granite; references in the text and Table 2.

spécifiques sur des dykes reconnus comme appartenant à cette période pourraient être envisagées. On indiquera par exemple que des dykes datés en Guyane vers 800 Ma par la méthode K-Ar (Delor *et al.*, 2001) et confirmés par la méthode Ar-Ar sur d'autres secteurs (Nomade, pers com.) ont fait l'objet d'une étude paléomagnétique (Théveniaut et Nomade, unpublished data). Les résultats indiquent une position du pôle vers 800-850 Ma à proximité du continent sud-américain.

Si ces résultats sont validés par une publication dans les années à venir, ils pourraient contribuer à tester l'appartenance du Bouclier des Guyanes au supercontinent Rodinia (Hoffman, 1989 ; Dalziel, 1992 ; Condie, 2000).

Le Paléozoïque

Nous avons sciemment inscrit ce chapitre dans cette revue afin de rappeler qu'aucune étude n'avait jusqu'ici été entreprise sur des formations du Paléozoïque.

De nombreux affluents de l'Amazone, globalement nord-sud permettraient a priori des échantillonnages en continu le long des formations paléozoïques siluro-dévonniennes qui frangent de manière remarquable la bordure sud du Bouclier des Guyanes. Il serait ainsi possible d'appréhender, les stades de proto-ouverture du sillon amazonien, bien avant son fonctionnement Crétacé à actuel. Ce type d'étude couplée avec des approches similaires sur les côtes centre-atlantique d'Afrique de l'Ouest permettrait d'apporter des

contraintes supplémentaires sur les mouvements de plaques tectoniques qui ont abouti à la formation de la chaîne hercynienne. Ceci offrirait aussi de nouvelles contraintes paléogéographiques très utiles à la compréhension du fonctionnement du bassin de l'Amazonie et donc de la formation de ses ressources en hydrocarbures.

Les dykes et les sills du Mésozoïque

Le volcanisme circum-Atlantique (May, 1971), bien que reconnu depuis longtemps sur le Bouclier des Guyanes (Priem *et al.*, 1968 ; Choubert 1974) n'a pu être daté avec précision que récemment grâce à l'avènement de la méthode Ar-Ar (Deckart, 1996 ; Deckart *et al.*, 1997 ; Nomade *et al.*, 2000 ; Nomade, 2001). Les premières références d'âges (Priem *et al.*, 1968) proviennent de la frontière entre le Surinam et la Guyane. Les datations suivantes sont citées au Venezuela (MacDonald et Opdyke, 1974) et au Guyana (Hargraves, 1978). Ces datations ont été essentiellement obtenues par la méthode K-Ar. Priem *et al.* (1968), repris ensuite par Veldkamp et coll. (1971) indiquent, à partir d'un âge à 226 Ma, qu'il s'agit d'émissions d'âge permotriassique. Cet âge correspond en fait, selon l'échelle de Gradstein *et al.*, (1995), à la base du Trias supérieur. MacDonald et Opdyke (1974) présentent des âges entre 192 et 198 Ma à la limite Trias-Jurassique. Les âges présentés par Hargraves (1978), entre 262 et 450 Ma, sont quant à eux fortement perturbés par des excès d'argon.

Ce n'est que récemment, en Guyane, que des précisions ont pu être obtenues par l'utilisation de la méthode Ar-Ar sur minéraux (Deckart, 1996 ; Deckart *et al.*, 1997 ; Nomade, 2001). Les âges obtenus, entre 190 et 200 Ma, confirment que la majorité des dykes, présents un peu partout sur le bouclier en bordure de l'océan Atlantique doivent être rapportés à la Province Magmatique de l'Atlantique Central ou "Central Magmatic Atlantic Province (CAMP)" (Marzolo *et al.*, 1999) dont la mise en place s'est déroulée à la limite entre le Trias supérieur et le Jurassique inférieur (Courtilot et Renne, 2003).

Les premières études paléomagnétiques, menées il y a une trentaine d'années, se sont donc naturellement intéressées à ces dykes basaltiques, ces roches renfermant a priori un fort signal magnétique mesurable. Les premiers résultats ont été obtenus au Venezuela et au Guyana (tabl. 2, pôle Group III, Hargraves, 1968) dans le cadre d'une étude essentiellement axée sur les dykes et sills du Protérozoïque. Trois autres études ont suivi au Surinam (tabl. 2, pôle PTrI, Veldkamp *et al.*, 1971), de nouveau au Venezuela (tabl. 2, pôle Bol et Gua, MacDonald et Opdyke, 1974) et encore au Guyana (tabl. 2, pôle Gd, Hargraves, 1978). Les critères de qualité ou de confiance tels qu'indiqués dans le tableau 1 sont plutôt faibles pour ces quatre études (tabl. 2). Ceci est lié au fait que les âges étaient plutôt mal contraints (Veldkamp, 1971 ; Hargraves, 1978) en raison de la méthode employée (K-Ar)

et des problèmes de pertes ou d'excès d'argon. Les traitements, à cette époque, n'étaient pas non plus complets. Les représentations en projections orthogonales initiées par l'école hollandaise (Zijderveld, 1967) n'en étaient qu'aux balbutiements, etc.

Pour les critères de Van der Voo (1990), ils varient entre 2 et 5 avec, pour tous les pôles obtenus, la cohérence tectonique/appartenance au craton stable et la non-ressemblance avec des paléopôles plus récents. Ce dernier point ne pouvait être validé car il n'y a pas de pôles paléomagnétiques disponibles pour les périodes plus récentes et l'on sait depuis que l'Amérique du Sud a peu dérivé depuis 200 Ma (Besse et Courtillot, 2001). En fait, seuls le nombre de sites/échantillons et les statistiques paraissent justifier de la qualité de ces études. Selon les critères de Schmidt *et al.* (1990), tous les pôles sont de catégorie C sauf celui du Surinam (tabl. 2, pôle PTrI) qui est de catégorie B bien qu'avec un âge probablement erroné.

Selon les critères définis au tableau 1, les pôles sont de catégorie MagE, celui du Surinam est de catégorie MagB. Pour les âges, ceux du Venezuela (tabl. 2, pôles Bol et Gua, MacDonald et Opdyke, 1974) sont de catégorie AgeA, pour les autres pôles tous les âges peuvent être considérés AgeB si l'on se réfère aux datations les plus récentes obtenues en Guyane (Deckart, 1996 ; Deckart *et al.*, 1997).

Il est cependant important de noter ici qu'en dehors de la première étude de Hargraves (1968), les trois autres études ont été menées dans le cadre d'approche combinée de paléomagnétisme et de géochronologie avec notamment pour la dernière étude (Hargraves, 1978) des datations sur chaque site paléomagnétique mais malheureusement sans succès.

L'étude la plus récente conduite sur des dykes (Nomade *et al.*, 2000), plus de vingt ans après celle de Hargraves (1978), a été réalisée à partir de datations Ar-Ar récentes (Deckart *et al.*, 1997) ainsi que sur un échantillonnage conséquent (30 sites, 184 échantillons), réparti sur l'ensemble de la Guyane mais aussi au nord de l'Amapá au Brésil (entre Oiapoque et Cassiporé). Tout ce qui concourt à la recherche de la meilleure définition de la donnée paléomagnétique sur ce type de roche a été réalisé sur cet échantillonnage avec comme conséquence des critères de qualité ou de confiance (tabl. 2, pôles A et B) quasi-idéaux. Les auteurs concluent, à partir d'une légère dispersion des pôles en deux groupes (pôles A et B) que cela pourrait être interprété comme le résultat d'un polyphasage des émissions volcaniques qui ne seraient ici identifiable que par les différences d'enregistrement des signaux paléomagnétisme tandis que les méthodes géochronologiques montreraient dans ce cas leur limite de résolution.

Il apparaît évident que les quatre premières études paléomagnétiques sur les dykes du Jurassique ont été réalisées trop tôt par rapport aux développements réalisés

depuis en paléomagnétisme et en géochronologie. Il est tout aussi probable que tous ces résultats sont bien représentatifs d'aimantations acquises au Jurassique inférieur.

Sur la figure 8a, nous avons représenté tous les pôles de chaque site (VGP, Virtual Geomagnetic Poles) des études détaillées ci-dessus. Il y a ainsi 63 sites correspondants à plus de 400 échantillons prélevés sur l'ensemble du Bouclier des Guyanes. A quelques exceptions près, on peut noter un assez bon groupement de l'ensemble de ces pôles. Sur la figure 8b, nous avons représenté le pôle moyen de ces dykes intrusifs du Jurassique (JID, tabl. 2) ainsi que les deux pôles A et B des possibles deux phases d'émission proposées par Nomade *et al.* (2000). Si le pôle B est quasi-équivalent du pôle moyen JID, le pôle A ne semble pas être confirmé par les autres données du Bouclier des Guyanes. Il apparaît par contre possible d'identifier une sorte d'allongement des positions des différents pôles sans pour autant qu'une contrainte temporelle précise puisse y être associée. La présence d'une composante partielle de variation séculaire pourrait être évoquée mais de par la représentativité spatiale de tous les sites de prélèvements depuis le Venezuela au nord jusqu'au Brésil au sud-est, cela ne semble pas être un argument qui peut être pris en compte.

Bien que très proche du pôle actuel, le pôle moyen du Jurassique indique que le Bouclier des Guyanes était déjà dans une paléoposition semblable à celle actuelle il y a 200 Ma. Si les légères dispersions observées dans les positions de ces pôles par rapport à la moyenne sont liées à un polyphasage des émissions volcaniques comme cela a été suggéré (Nomade *et al.*, 2000), seules des études géochronologiques très précises permettront de discuter l'existence et la durée d'un éventuel polyphasage.

La signification d'un tel polyphasage serait à discuter en tenant compte des données acquises par les études pétrolières "offshore" qui postulent une tectonique décrochante dextre dès le début de l'ouverture de l'Atlantique sud, lors de la séparation des plateaux du Demerara, au large de la Guyane, et de Guinée Bissau (Gouyet, 1988). Ce cisaillement dextre aurait eu une composante locale en transpression, avec une direction de raccourcissement NNW-SSE et des coulissages dextres marqués le long de directions NW-SE.

De telles directions dominantes sont observées sur le littoral guyanais, et pourraient représenter les équivalents "on-shore" préservés de ces stades d'ouverture océanique.

Les latérites du Cénozoïque

Les seules études paléomagnétiques réalisées sur cette période concernent des profils latéritiques pour lesquels le paléomagnétisme a été utilisé comme outil de datation relative (Théveniaut et Freyssinet, 1999 et 2002). En effet,

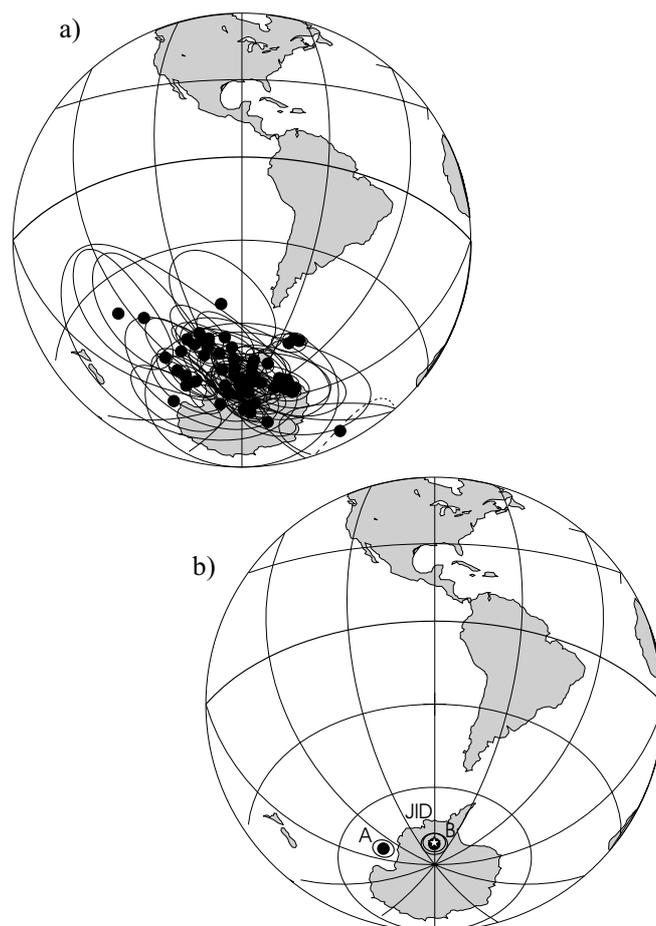


Fig. 8.- Représentation des pôles paléomagnétiques obtenus sur les dykes d'âge jurassique du Bouclier des Guyanes, a) pôles de chaque site, b) pôle moyen (JID) ainsi que les deux pôles A et B de Nomade *et coll.* (2000), autres références dans le texte et le tableau 2.

Fig. 8.- Plot of the paleomagnetic poles obtained on the Jurassic dikes of the Guiana Shield. a) poles of each site; b) average pole (JID) and well as poles A and B of Nomade *et coll.* (2000); other references in the text and Table 2.

le chemin de dérive apparent du pôle de l'Amérique du Sud est bien connu pour la période comprise entre 200 Ma et l'actuel (Besse et Courtillot, 1991) et peut donc être utilisé pour dater des séries continentales azoïques, parmi lesquelles les formations latéritiques, ne possédant pas de calage stratigraphique mais possédant un signal magnétique fossilisé lors du dépôt ou de la formation des roches. Pour cette raison, les détails sur les pôles obtenus n'ont pas été inscrits dans le tableau 2.

Les travaux sur les latérites (Théveniaut et Freyssinet, 1999 et 2002) ont montré qu'il est possible d'utiliser le paléomagnétisme sur des roches qui fossilisent une aimantation rémanente chimique (ARC) lors de la croissance des oxyhydroxydes de fer. Ces travaux réalisés en Guyane et au Surinam sur différentes paléosurfaces étagées et aussi marquées par des faciès latéritiques distincts ont permis d'identifier un schéma de certaines grandes phases d'altération sur le Bouclier des Guyanes

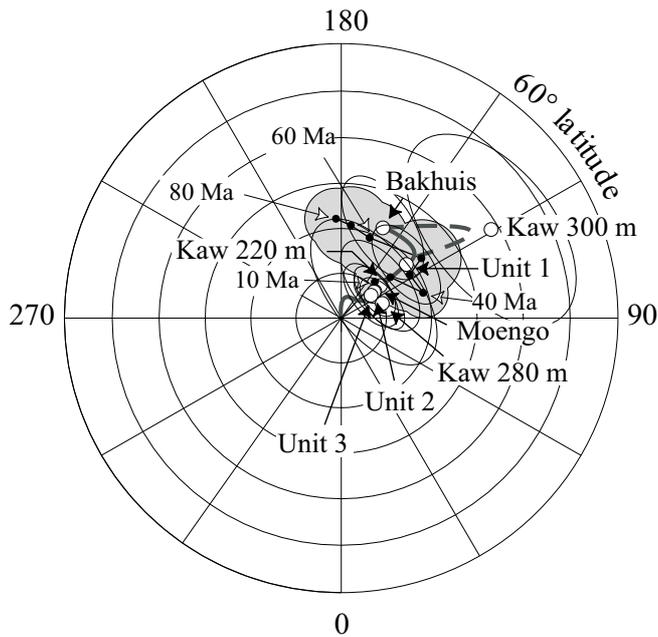


Fig. 9.- Représentation stéréographique des pôles obtenus sur les différentes paléosurfaces cuirassées de Guyane et du Surinam (Théveniaut et Freyssinet, 2002).

Fig. 9.- Stereographic plot of the poles obtained on the different duricrusts in French Guiana and Surinam (Théveniaut and Freyssinet, 1999).

deux surfaces bauxitiques (Montagne de Kaw) à aluminoferrugineuses (Unité 1, Mont Baduel) vers 45 Ma à l'Eocène. Pour les autres paléosurfaces, qu'elles soient ferrugineuses (Unité 2) ou bauxitiques (Moengo), leur âge Miocène et leur basse altitude, vers 50 m, sont semblables. Enfin la dernière paléosurface située au niveau de la mer (Unité 3) qui était supposée être très récente voire actuelle, son signal paléomagnétique ne la distingue quasiment pas de celui du Miocène de la paléosurface précédente.

Ces trois à quatre phases d'altération entrecoupées de phases d'érosion qui ont entaillé le paysage sont donc très fortement marquées par les altitudes actuelles et probablement initiales des paléosurfaces et non pas leur nature bauxitique ou ferrugineuse. Il ressort aussi de ces études que l'Oligocène est une période majeure d'arrêt des phases d'altération. Enfin, la datation de ces paléosurfaces étagées entre 300 m et le niveau de la mer a permis de calculer une vitesse d'érosion entre chaque surface. Cette vitesse de 2-3 m/Ma apparaît, par cette approche physique, tout à fait cohérente avec les approches géochimiques classiques des grandes phases d'altération et d'érosion (réf. in Théveniaut et Freyssinet, 1999, 2002).

Les latérites du Quaternaire

Sur cette période, nous disposons de résultats magnétostratigraphiques en Guyane (Théveniaut et Freyssinet, 1999), mais aussi paléomagnétiques en Guyane et au Surinam. Comme pour les données du chapitre précédent, les pôles discutés ci-après n'ont pas été inscrits dans le tableau 2.

Pour les résultats paléomagnétiques, il a été montré (Théveniaut et Freyssinet, 2002) que les profils cuirassés les plus anciens pouvaient (fig. 9), lorsqu'ils étaient échantillonnés en détail, présenter des différences d'enregistrement magnétique entre le sommet (fig. 6) et la base de la cuirasse (fig. 10). La superposition de deux signaux fossiles anciens et récents au sein des profils latéritiques est donc un phénomène très important marquant d'une part une très bonne fossilisation du signal paléomagnétique lors de la formation du profil mais aussi la possibilité d'identifier et de dater des polyphasages des phénomènes d'altération.

Les résultats magnétostratigraphiques obtenus lors de l'étude du profil latéritique complet du Mont Baduel (fig. 11, Théveniaut et Freyssinet, 1999) sont très importants pour la compréhension des processus d'altération. La présence à la base du profil, dans la saprolite au contact avec la roche saine paléoprotérozoïque, de directions de polarité normale, donc semblable à celle actuelle, a pu confirmer l'aspect récent à actuel des phénomènes d'altération. Ceux-ci transforment les roches du Bouclier des Guyanes en saprolite puis ultérieurement en cuirasse ferrugineuse ou

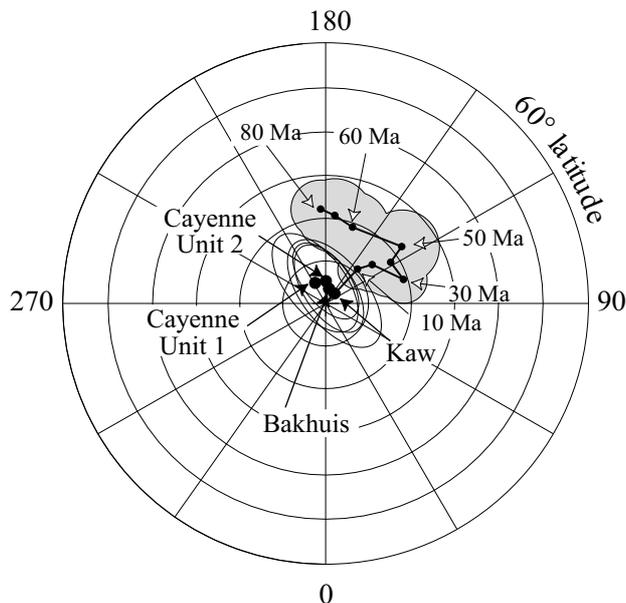


Fig. 10.- Idem figure 6 pour la base des profils cuirassés étudiés.

Fig. 10.- As Figure 9 for the base of the studied duricrust profiles.

(fig. 9). La surface bauxitique des Monts Bakhuis au Surinam, la plus élevée de celles étudiées, vers 300 m d'altitude, apparaît ainsi être la plus ancienne. L'âge relatif obtenu situe sa formation au début du Tertiaire. Les autres surfaces les plus élevées étudiées sont en Guyane, au Mont Baduel, à 100 m d'altitude, et à la Montagne de Kaw, équivalent ayant fait l'objet d'une surrection récente. Les résultats paléomagnétiques placent la formation de ces

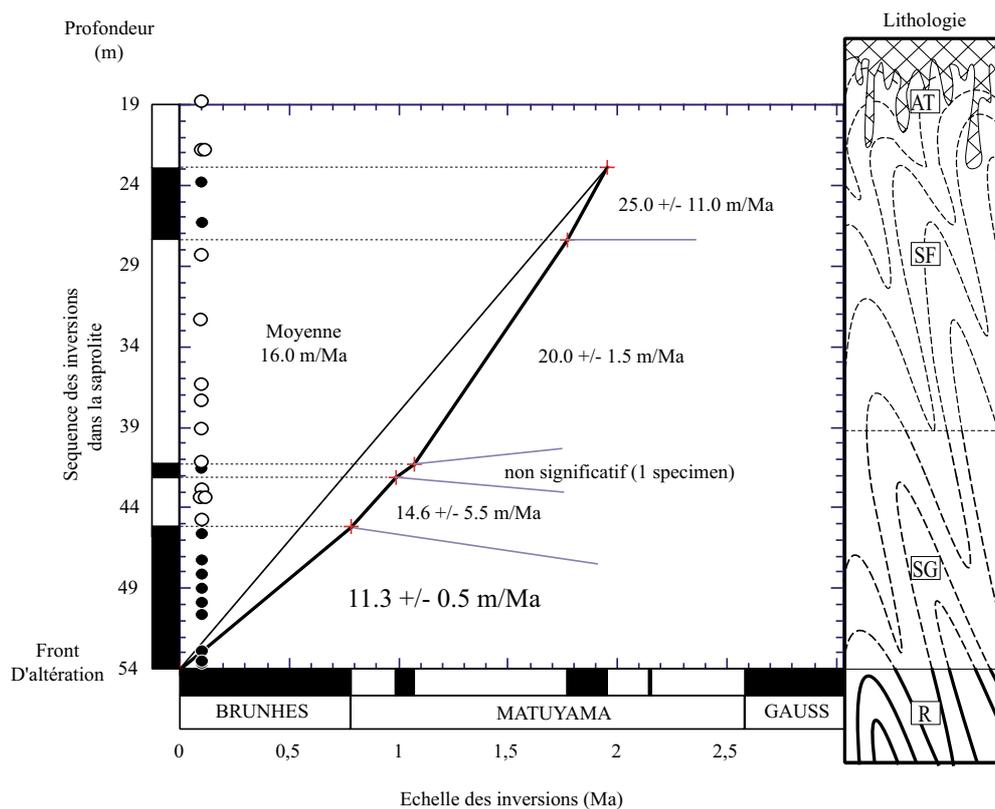


Fig. 11.- Résultats magnétostratigraphiques du profil de Mont Baduel, Guyane (Théveniaut et Freyssinet, 1999).

Fig. 11.- Magnetostratigraphic results from the Mont Baduel section, French Guiana (Théveniaut et Freyssinet, 1999).

alumino-ferrugineuse. Par l'utilisation des inversions du champ magnétique terrestre, la magnétostratigraphie, il a été possible de quantifier la vitesse d'altération et donc la progression du front de ferruginisation d'un profil latéritique. Cette approche physique a ainsi donné des résultats semblables à ceux obtenus par les bilans géochimiques avec une vitesse d'altération de l'ordre de 11 m/Ma avec une possible indication, par des inversions plus anciennes, d'un ralentissement des phénomènes d'altération avec l'épaississement du profil (fig. 11).

Conclusion et perspectives

Méthodologie

Le bilan présenté ici sur les études paléomagnétiques réalisées jusqu'à présent sur le Bouclier des Guyanes démontre que seule une très faible quantité de données répond aux critères de qualité existants ou définis ici pour les données du Précambrien. Les mesures revêtent souvent une qualité moyenne et on note de nombreuses lacunes sur la définition de l'âge des aimantations caractérisées. Les résultats récents, fondés sur des échantillonnages suffisants, des analyses détaillées et associés à des datations radiométriques multi-méthodes suggèrent que les études paléoma-

gnétiques qui vont se développer dans le futur proche permettront de définir de façon beaucoup plus précise l'évolution du Bouclier des Guyanes depuis le Paléoprotérozoïque.

Il devient en effet nécessaire, non seulement de connaître précisément l'âge de la roche étudiée, ce qui est assez simple pour une roche sédimentaire ou magmatique non métamorphique, mais aussi de pouvoir contraindre l'âge magnétique.

Compte tenu de la nécessité d'avoir des âges fiables et les plus précis possibles, l'âge du signal devra être appréhendé par une méthode et un minéral approchant de plus près la température de blocage du minéral porteur du signal magnétique (*i.e.* datation Ar-Ar sur amphibole versus signal paléomagnétique sur magnétite).

Dans le cas des domaines protérozoïques polyphasés, l'utilisation de plusieurs chronomètres minéraux, bien que plus lourde à mettre en œuvre reste le moyen le plus sûr d'appréhender les notions de vitesse de refroidissement du domaine crustal étudié, et de discuter l'âge paléomagnétique dans son contexte géodynamique. Ces recommandations dépassent le simple cadre du Bouclier des Guyanes et peuvent être étendues à l'ensemble des formations cristallines précambriennes.

C'est à cette seule condition que les études paléomagnétiques sur les séries du Protérozoïque du Bouclier des Guyanes permettront d'établir un chemin de dérive apparente du pôle. Il s'agit ici de l'une des contraintes majeures, qui fait actuellement défaut et qui servira à mieux replacer le Bouclier des Guyanes au sein de l'ensemble des cratons du Précambrien et à ainsi retracer son évolution dans son paléocadre géodynamique.

Potentiel d'étude géodynamique du Bouclier des Guyanes

Peu de domaines continentaux présentent le potentiel du Bouclier des Guyanes en matière de marqueurs géologiques, exprimés de façon globalement continue entre 2 Ga et 1 Ga. En termes événementiels et géographiques ces marqueurs ne sont pas prédominants aux mêmes endroits, ce qui laisse entrevoir la perspective de les discriminer au regard des processus de rééquilibrages thermiques des événements les plus récents sur les plus anciens. Nous n'aborderons pas volontairement la période archéenne, dans la mesure où les aires géographiques réputées de cet âge présentent des protolithes ante-2,5 Ga intensément réactivés au Transamazonien, et notamment dans des conditions thermiques supérieures à 600-700 °C (fusion et/ou métamorphisme granulitique) excluant la préservation des enregistrements paléomagnétiques archéens.

Dans cette optique, nous discutons ci-dessous les thématiques d'étude envisageables selon les grands domaines régionaux et les objets géologiques qui leur sont propres.

Paléoprotérozoïque et tectonique des plaques

L'utilisation du paléomagnétisme peut se révéler d'intérêt primordial pour l'étude des régimes thermotectoniques qui ont abouti à la structuration du Bouclier des Guyanes. Les études les plus récentes (Nomade, 2001 ; Nomade *et al.*, 2002) ont apporté des renseignements plus précis sur l'histoire transamazonienne et les relations avec l'histoire géodynamique birimienne, vers 2,1 Ga. Il reste encore à décrypter, à l'échelle transatlantique, 1) l'évolution géodynamique précoce des formations paléoprotérozoïques (Rhyacien: 2,2-2,1 Ga), et 2) l'évolution géodynamique tardive de ces mêmes formations, (Orosirien : 2,05-1,8 Ga).

Rhyacien

Si tous les travaux modernes s'accordent à envisager vers 2,1 Ga un contexte collisionnel de domaines paléoprotérozoïques juvéniles dans un régime transcurent sénestre, l'histoire précoce (*ca.* 2,2 Ga) de ces domaines reste encore largement débattue : diapirisme, ouverture océanique de faible ou large amplitude, etc.).

En étudiant les domaines précoces de type TTG datés à 2,18-2,13 Ga en Guyane, et latéralement dans le bouclier quand ils seront clairement définis, on pourra envisager de discuter l'histoire de ces blocs juvéniles les uns par rapport aux autres, à l'intérieur du domaine transamazonien, mais aussi à l'échelle transatlantique, ce qui permettrait d'en déduire les « vergences géodynamiques » et leur amplitude, donc de conclure à des processus de convergence (collisionnels), à des fermetures d'océan, à des rotations de blocs continentaux etc. À ce titre, il faudra s'affranchir de tous les phénomènes de resetting thermique afin d'obtenir des signaux magnétiques et des âges de formation et d'aimantation fiables pour la période, autour de 2,2 Ga.

Orosirien

L'étude des domaines granulitiques de haute température (2,05-1,95 Ga) et du cycle d'accrétion Uatumã (1,95-1,8 Ga) est entièrement à explorer dans le détail et reste le dernier événement ayant généré des volumes considérables de produits crustaux. À ce titre, il devrait être possible d'identifier des signaux magnétiques et des âges isotopiques, en s'affranchissant des resetting thermiques ultérieurs, limités à la mise en place de dykes doléritiques.

Méso-protérozoïque et évolution volcano-sédimentaire intracontinentale

L'étude des formations du « cycle Roraima » est un sujet d'envergure, à la mesure des conclusions qu'on peut en attendre pour une période couvrant 300 millions d'années en termes d'âges de sédimentation, et de marges d'erreur associées, à ce stade de nos connaissances.

Les études à venir devront privilégier l'échantillonnage dans la dimension verticale, et si possible le long de coupe où des sills offrent un potentiel de datation. Pour ces dernières le couplage entre la méthodologie Ar-Ar et des méthodes et des chronomètres de plus haute température (U-Pb sur baddeleyite) sera un gage de succès. Il sera de plus possible de coupler une datation précise de ces phases volcaniques avec des tests paléomagnétiques (de contact de recuit) pouvant renforcer la qualité/confiance de ces données.

Evolution protérozoïque à Paléozoïque : étude des dykes

Compte tenu de la relative stabilité du Bouclier guyanais après 1,5 Ga, les dykes représentent probablement les seuls objets géologiques permettant une étude paléomagnétique et isotopique, pour la période post Mésoprotérozoïque jusqu'au Paléozoïque, avec parmi les premiers candidats les générations récemment mises en évidence vers 800-850 Ma en Guyane (Delor *et al.*, 2001) et à 1,5 Ga au Surinam (de Roever *et al.*, 2001, 2002).

Par ailleurs, les dykes à 1,9 Ga contribueraient à contraindre l'histoire finie-transamazonienne du Bouclier des Guyanes.

Evolution au Paléozoïque

Concernant l'époque Paléozoïque, les formations siluro-dévonniennes qui limitent au sud le Bouclier des Guyanes permettraient de décrypter les mécanismes de proto-ouverture du sillon amazonien, et de les confronter avec ceux ayant abouti ailleurs à la formation de la chaîne hercynienne.

Mésozoïque et ouverture de l'Atlantique

Les travaux récents, réalisés sur la marge atlantique de Guyane, ont conclu à l'âge liasique de l'essai de dolérites qui préfigure les stades d'ouverture de l'Atlantique Sud. Pour autant la perspective d'un polyphasage serait à discuter en tenant compte des données acquises par les études pétrolières "offshore", dont les directions de structuration NNW-SSE et NW-SE sont aussi celles constatées pour les dykes de Guyane.

Néotectonique et exhumation différentielle supracustale

L'apport des données paléomagnétiques sur les formations cénozoïques et quaternaires permet d'envisager des études couplées avec des chronomètres isotopiques dédiés aux rééquilibrations isotopiques de faible température en rapport avec l'amplitude des mouvements supracrustaux envisagés. Outre la méthodologie des traces de fission, les nouvelles méthodologies émergentes telles que U-Th-He sur apatite, et monazite seront à considérer.

Etude des profils latéritiques

Enfin, les premiers pas sur l'étude des profils latéritiques devraient initier de telles études sur d'autres profils d'altération du centre du Bouclier des Guyanes notamment sur des formations à haute altitude comme les sédiments du Roraima.

Longtemps resté à l'écart de l'attention de la communauté paléomagnétique internationale, le Bouclier des Guyanes présente un potentiel très fort pour lequel les études récentes, réalisées notamment en Guyane française, laissent présager un avenir des plus prometteurs.

Références

- Avelar V.G. de, Lafon J.M., Delor C., Guerrot C., Lahondère D. (2003) - Archean crustal remnants in the Easternmost part of the Guiana Shield: Pb-Pb and Sm-Nd geochronological evidence for Mesoarchean versus Neoproterozoic signatures. *Géologie de la France*, **2-3-4**, 83-99.
- Avelar V.G. (2002) - Geocronologia Pb-Pb em zircão e Sm-Nd Rocha total da porção centro-norte do Estado do Amapá-Brasil: implicações para a evolução geodinâmica do setor oriental do Escudo das guianas. Doctoral thesis, Belém, CPGG-UFGA, 212 p.
- Besse J., Courtillot V. (1991) - Revised and Synthetic apparent polar wander paths of the African, Eurasian, North American and Indian plates, and true polar wander since 200 Ma. *J. Geophys. Res.*, **96**, 4029-4050.
- Castillo J.H., Constanzo-Alvarez V. (1993) - Paleomagnetism of the Uairen Formation, Roraima Group, southeastern Venezuela : evidence for one of the oldest (Middle Proterozoic) depositional remanent magnetizations. *Can. J. Earth Sci.*, **30**, 2380-2388.
- Choubert B. (1974) - Le Précambrien des Guyanes. Mém BRGM, Orléans, 81, 213 p.
- Condie K.C. (2000) - Episodic continental growth models: afterthoughts and extension. *Tectonophysics*, **322**, 153-162.
- Courtillot V., Renne P.R. (2003) - On the age of flood basalt events. *C.R. Géoscience*, **335**, 113-140.
- Dalziel I.W.D. (1992) - On the organization of American plates in the Neoproterozoic and break out of Laurentia, *GSA Today*, **2**, 240-241.
- Dardenne M.A., Schobbenhaus C. (2003) - Metallogeny of the Guiana Shield. *Géologie de la France*, **2-3-4**, 291-319.
- Deckart K. (1996) - Etude du magmatisme associé au rifting de l'Atlantique Central et Sud : géochronologie $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ et géochimie sur les intrusions jurassiques de Guinée et de Guyane française/Suriname, et crétaées du Brésil. Ph. D. Thesis, Université de Nice Sophia-Antipolis, 221 p.
- Deckart K., Feraud G., Bertrand H. (1997) - Age of Jurassic continental tholeiites of French Guyana, Suriname and Guinea: Implications for the initial opening of the Central Atlantic Ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **150**, 205-220.
- Delor C., Lahondère D., Egal E., Marteau P. (2001) - Carte géologique de la France à 1/500 000, Guyane, 2^{ème} édition, Orléans, BRGM.
- Delor C., Lahondère D., Egal E., Lafon J.M., Cocherie A., Guerrot C., Rossi P., Truffert C., Théveniaut H., Phillips D., Avelar V.G. de (2003) - Transamazonian crustal growth and reworking as revealed by the 1:500,000 - scale geological map of French Guiana (2nd edition). *Géologie de la France*, **2-3-4**, 5-57.
- Delor C., Roeber E.W.F. de, Lafon J.M., Lahondère D., Rossi P., Cocherie A., Guerrot C., Potrel A. (2003) - The Bakhuis ultrahigh-temperature granulite belt (Suriname): II. implications for late Transamazonian crustal stretching in a revised Guiana shield framework. *Géologie de la France*, **2-3-4**, 207-230.
- Fraga L.M., Almeida M.E., Macambira M.J.B. (1997) - First lead-lead zircon ages of charnockitic rocks from Central Guiana Belt (CGB) in the state of Roraima, Brazil. South American Symposium on Isotope Geology. Extended Abstracts. 115-117.
- Gibbs A.K., Barron C.N. (1993) - The Geology of the Guiana Shield. Oxford University Press, 246 p.

- Gouyet S. (1988) - Evolution tectonosédimentaire des marges guyanaises et brésiliennes au cours de l'ouverture de l'Atlantique Sud. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux.
- Gradstein F.M., Agterberg F.P., Ogg J.G., Hardenbol J., van Veen P., Thierry J., Huang Z. (1995) - A Triassic, Jurassic and Cretaceous Time Scale, Geochronology Time Scales and Global Stratigraphic Correlation. SEPM Special Publication, n° 54, 95-126.
- Hargraves R.B. (1968) - Palaeomagnetism of the Roraima dolerites. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **16**, 147-160.
- Hargraves R.B. (1978) - Problems in palaeomagnetic synthesis illustrated by results from Permo-Triassic dolerites in Guiana. *Phys. Earth Planet. Int.*, **16**, 277-284.
- Hebeda E.H., Boelrijk N.A.I.M., Priem H.N.A., Verdurmen E.A.Th., Verschure R.H., (1973) - Excess radiogenic argon in Precambrian Avanaver dolerite in western Suriname (South America). *Earth Planet. Sci. Letters*, **20**, 189-200.
- Hoffman P.F. (1989) - Speculation on Laurentia's first Gigayear (2.0 to 1.0). *Geology*, **17**, 135-138.
- Idnurm M., Giddings J.W. (1988) - Australian Precambrian polar wander: a review. *Precambrian Res.*, **40/41**, 61-88.
- Irving E. (1956) - Palaeomagnetic and palaeoclimatological aspects of polar wandering. *Geofis. Pura e Appl.*, **33**, 23-41.
- João X.S.J., Marinho P.A.C. (1982) - Catametamorfismos arqueanos da região centro-leste do território Federal do Amapá. In: Simpósio Geológico da Amazonia I, Belém. Anais... Belém. SBG. Vol. 2, 207-228.
- Kirschvink J.L. (1980) - The least-square line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **139**, 133-143.
- Lafon J.M., Rossi P., Delor C., Avelar V.G., Faraco M.T.L. (1998) - Novas testemunhas de relíquias arqueanas na crosta continental paleoproterozóica da Província Maroni-Itacaiúnas (Sudeste do Escudo das Guianas). In: Congresso Brasileiro de Geologia, 40 ; Belo Horizonte. Anais, p. 64.
- Ledru P., Johan V., Milési J.P., Tegye M. (1994) - Markers of the last stages of the Paleoproterozoic collision: evidence for a 2 Ga continent involving circum-South Atlantic provinces. *Precambrian Res.*, **69**, 169-191.
- Lima M.I.C., Montalvão R.M.G., Issler R.S., Oliveira A.S., Basei M.A.S., Araújo J.F.V., Silva G.G. (1974) - Geologia da folha NA/NB Macapá. Rio de Janeiro, DNPM, Projeto Radambrasil, Levantamento de Recursos Naturais, vol. 6, 3-120.
- Macdonald W.D., Opdyke N.D. (1974) - Triassic Paleomagnetism of Northern South America. *Amer. Ass. Petroleum Geol. Bull.*, **58**, 208-215.
- McElhinny M.W., McWilliams M.O. (1977) - Precambrian geodynamics-a palaeomagnetic view. *Tectonophysics*, **40**, 137-159.
- McFadden P.L., Mc Elhinny M.W. (1990) - Classification of the reversal test in paleomagnetism. *Geophys. J. Int.*, **103**, 725-729.
- Marot A. (1988) - Guyane Sud. Carte Géologique de la France au 1/500 000 - Département de la Guyane. Ed. BRGM. Notice explicative. 86 p.
- Marzoli A., Renne P.R., Piccirillo E.M., Ernesto M., Bellieni G., De Min A. (1999) - Extensive 200-million-year-old continental flood basalts of the Central Atlantic Magmatic Province. *Science*, **284**, 616-618.
- May P.R. (1971) - Patterns of Triassic diabase dikes around the North Atlantic in context of predrift position of the continents. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **82**, 1285-1292.
- Milési J.P., Egal E.E., Ledru P., Vernhet Y., Thièblemont D., Cocherie A., Tegye M., Martel-Jantin B., Lagny P. (1995) - Les minéralisations du Nord de la Guyane Française, dans leur cadre géologique. *Chronique de la Recherche Minière*, **518**, 5-58.
- Milési J.P., Lerouge C., Delor C., Ledru P., Billa M., Cocherie A., Egal E., Fouillac A.M., Lahondère D., Lasserre J.L., Marot A., Martel-Jantin B., Rossi Ph., Tegye M., Théveniaut H., Thièblemont D., Vanderhaeghe O. (2003) - Gold deposits (gold-bearing tourmalinites, gold-bearing conglomerates, and mesothermal lodes): markers of the geological evolution of French Guiana: geology, metallogeny and stable-isotope constraints. *Géologie de la France*, **2-3-4**, 257-290.
- Miron-Valdespino O.E., Constanzo-Alvarez V. (1997) - Paleomagnetic and rock magnetic evidence for inverse zoning in the Parguaza batholith (southwestern Venezuela) and its implications about tectonics of the Guiana Shield. *Precambrian Res.*, **85**, 1-25.
- Montalvão R.M.G. de, Tassinari C.C.G. (1984) - Geocronologia pré-cambriana do Território Federal do Amapá (Brasil). In: Simp. Amaz., 2, Manaus. Anais. Manaus, MME-DNPM, 54-57.
- Montgomery C.W., Hurley P.M. (1978) - Total rock U-Pb and Rb-sr systematics in Imataca Series, Guyana Shield, Venezuela. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **39**, 281-290.
- Nomade S. (2001) - Evolution géodynamique des cratons des Guyanes et d'Afrique de l'Ouest. Apport des données paléomagnétiques, géochronologiques ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) et géochimiques en Guyane et Côte-d'Ivoire. Ph.D thesis, Université d'Orléans, France.
- Nomade S., Féraud G., Chen Y., Pouclet A. (2002) - Thermal evolution of the Palaeoproterozoic Transamazonian orogen as deduced from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ along the Oyapok River (French Guiana). *Precambrian Res.*, **114**, 35-53.
- Nomade S., Chen Y., Féraud G., Pouclet A., Théveniaut H. (2001) - First Palaeomagnetic and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ study of Palaeoproterozoic rocks from the French Guiana (Camopi and Oyapok rivers), northeastern Guiana Shield. *Precambrian Res.*, **109**, 239-256.
- Nomade S., Chen Y., Pouclet A., Féraud G., Yao Daouda B., Théveniaut H., Vidal M., Rigolet C. (2002) - The Guiana and the West-African Shield Palaeoproterozoic grouping: New palaeomagnetic data for French Guiana and the Ivory-Coast. *Geophys. J. Int.*
- Nomade S., Théveniaut H., Chen Y., Pouclet A., Rigollet C. (2000) - Palaeomagnetic study of French Guiana Early Jurassic dolerites: Hypothesis of a multistage magmatic event. *Earth Planet. Sci. Lett.* **184**, 155-168.
- Norcross C.E., Davis D.W., Spooner E.T.C. (1998) - U-Pb geochronology of the Omai intrusion hosted Au-quartz vein deposit and host rocks, Guyana, South America. In: GSA Annual Meeting, Toronto, Ontario, p. A-127.
- Onstott T.C., Hargraves R.B. (1981) - Proterozoic transcurrent tectonics: Palaeomagnetic evidence from Venezuela and Africa. *Nature*, **289**, 131-137.

- Onstott T.C., Hardgraves R.B., York D., Hall C. (1984) - Constraints on the notions of South America and African Shields during the Proterozoic: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Palaeomagnetic correlations between Venezuela and Liberia. *Geol. Soc. Am. Bull.* **95**, 1045-1054.
- Piper J.D.A. (1982) - The Precambrian palaeomagnetic record: the case for the Proterozoic Supercontinent. *Earth Planet Sci. Lett.*, **59**, 61-89.
- Priem H.N.A., Hebeda E.H., Boelrijk N.A.I.M., Verschure R.H. (1968) - Isotopic age determinations on surinam rocks, 3. Proterozoic and Permo-Triassic basalt magmatism in the Guiana shield. *Geol. en Mijnbouw*, **47**, 17-20.
- Priem H.N.A., Boelrijk N.A.I.M., Hebeda E.H., Kroonenberg S.B., Verdurmen E.A.Th., Verschure R.H. (1973) - Age of the Roraima formation in northeastern South America: evidence from isotopic dating of Roraima pyroclastic volcanic rocks in Surinam. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **84**, 1677-1680.
- Roever E.W.F. de, Kroonenberg S.B., Delor C., Phillips D., Rossi P. (2001) - The Käyser dolerites an alkaline dyke suite from Surinam. 7^o Symposium on amazonian geology, (CD-ROM).
- Roever E.W.F. de, Kroonenberg S.B., Delor C., Phillips D. (2003) - The Käyser dolerites, a Mesoproterozoic alkaline dyke suite from Suriname. *Géologie de la France*, **2-3-4**, 161-174.
- Runcorn S.K. (1956) - Paleomagnetic comparisons between Europe and North America. *Geol. Assoc. Canada Proc.*, **9**, 77-85.
- Santos J.O.S., Hartmann L.A., McNaughton N.J., Fletcher I.R. (2002) - Timing of mafic magmatism in the Tapajos province (Brazil) and implications for the evolution of the Amazon craton: evidence from baddeleyite and zircon U-Pb SHRIMP geochronology. *J. South Amer. Earth Sci.*, **15**, 409-429.
- Sato K., Tassinari C.C.G. (1997) - Principais eventos de acreção continental no Cráton Amazônico baseados em idade modelo Sm-Nd, calculada em evoluções de estágio único e estágio duplo. In: Costa M.L. & Angélica, R.S., eds. Contribuições à Geologia da Amazônia, Belém, Sociedade Brasileira de Geociências, p. 91-142.
- Schmidt P.W., Powell C.McA., Li Z.X., Thrupp G.A. (1990) - Reliability of Palaeozoic palaeomagnetic poles and APWP of Gondwanaland. *Tectonophysics*, **184**, 87-100.
- Snelling N.J., McConnell R.B. (1969) - The geochronology of Guyana. *Geol. en Mijnbouw*, **48-2**, 201-213.
- Tassinari C.C.G., Teixeira W., Siga Jr., O. (1978) - Considerações crono-estratigráficas da região das Chapadas do Cachimbo e Dardanelos. XXX Congresso Brasileiro de Geologia, 1, 477-490.
- Tassinari C.C.G., Macambira M.J.B. (1999) - Geochronological Provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, **22(3)**, 174-182.
- Tassinari C.C.G., Bettencourt J.S., Gerales M.C., Macambira M.J.B., Lafon J.M. (2000) - The Amazonian craton. In: "Tectonic evolution of South America", 41-95.
- Tassinari C.C.G., Teixeira W., Nutman A.P., Szabó G.A., Mondin M., Sato K. (2001) - Archean crustal evolution of the Imataca Complex, Amazonian Craton: Sm-Nd, Rb-Sr e U-Pb (SHRIMP) evidences. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 7. Belém. CD-Rom.
- Teixeira W. (1978) - Significação tectônica do magmatismo básico e alcalino na região Amazônica. Congresso Brasileiro de Geologia, **2**, 477-490
- Teixeira W., Tassinari C.C.G., Szabó G.J., Mondim M., Sato K., Santos A.P., Siso C.S. (1999) - Sm-Nd Constrains on protolith age of the Archean Imataca Complex, Venezuela. II South American Symposium on Isotope Geology, Actas, p. 136-138.
- Théveniaut H., Freyssinet P. (1999) - Paleomagnetism applied to lateritic profiles to assess saprolite and duricrust formation processes: the example of the Mont Baduel profile (French Guiana). *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* **148**, 209-231.
- Théveniaut H., Freyssinet P. (2002) - Timing of lateritization on the Guiana Shield: synthesis of paleomagnetic results from French Guiana and Surinam, *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* **178**, 91-117.
- Vanderhaeghe O., Ledru P., Thiéblemont D., Egal E., Cocherie A., Tegye M., Milési J.P. (1998) - Contraiting mechanism of crustal growth. Geodynamic evolution of the Paleoproterozoic granite-greenstone belts of French Guiana. *Precambrian Res.*, **92**, 165-193.
- Veldkamp J., Mulder F.G., Zijderfeld J.D.A. (1971) - Paleomagnetism of Surinam dolerites. *Phys. Earth Planet. Int.*, **4**, 370-380.
- Van der Voo R. (1990) - The reliability of paleomagnetic data. *Tectonophysics*, **184**, 1-9.
- Zijderfeld J.D.A. (1967) - A.C. demagnetisation of rocks: analysis of results, in Methods in Palaeomagnetism, Collinson D.W., Creer K.M. & Runcorn S.K., eds, 254-286, Elsevier, Amsterdam.

Annexe : Qualité des données paléomagnétiques

Nous proposons ici des critères de sélection adaptés aux problématiques du Précambrien, pour lesquels trois entrées sont proposées avec la source des publications, la qualité de l'étude paléomagnétique proprement dite et enfin la contrainte en âge des résultats.

Source des publications

Sont reconnues ici les données validées par un comité de lecture dans des revues où cette validation est un critère de qualité des résultats publiés (critère « + »). Les données peu ou pas accessibles (thèses, rapports) ou non validées par un comité de lecture (résumés, résumés étendus) auront un critère « - ». Ce critère est indicatif mais il peut permettre à tout lecteur d'utiliser ou de rejeter des données pour lesquelles des informations validées ou non validées pourraient renforcer la confiance que l'on peut placer dans cette donnée.

Classification paléomagnétique des pôles (tabl. 1)

Les critères présentés ci-après ne présentent donc uniquement que la qualité de l'étude paléomagnétique avec une qualité croissante liée aux informations que l'on peut avoir sur les traitements appliqués, les résultats obtenus, l'échantillonnage, les statistiques et les tests paléomagnétiques. L'âge de la roche ou de l'aimantation n'est pas pris en considération car il s'agit d'un paramètre qui n'intervient pas sur la qualité de l'étude mais sur la capacité d'utilisation de la donnée avec cette contrainte essentielle mais indépendante.

Catégorie "MagE"

A l'aube du XXI^{ème} siècle, grâce à l'évolution technologique des rémanomètres cryogéniques et rotatifs, et à la capacité des ordinateurs et des logiciels disponibles, tout paléomagnéticien est en droit d'espérer d'une étude paléomagnétique qu'elle présente des évidences de désaimantation complète des échantillons avec de claires illustrations et interprétations des analyses.

Si tel n'est pas le cas, les données ou pôles présentés peuvent être considérés comme non fiables ou de la catégorie "MagE".

Catégorie "MagD"

Quatre conditions sont nécessaires pour qu'une donnée paléomagnétique (ou un pôle) appartienne à cette catégorie.

- la désaimantation complète des échantillons par les méthodes thermiques, par champs alternatifs ou chimique doit être clairement établie ;

- des illustrations par des diagrammes vectoriels ou stéréographiques doivent confirmer le premier point ;

- la ou les composantes doivent avoir été identifiées et/ou séparées par analyse en composante principale (Kirschvink, 1980) ;

- les détails sur les sites de prélèvements (localisation, nombre d'échantillons, directions, statistiques, etc.) doivent être présents et réutilisables par tout lecteur selon les évolutions de la connaissance ou des concepts à venir.

Si ces quatre conditions minimums sont réunies, les résultats ou pôles peuvent être considérés comme indicatifs ou de la catégorie « MagD ».

Catégorie "MagC"

Si les quatre conditions préliminaires évoquées ci-dessus sont remplies, il convient d'introduire deux nouveaux paramètres :

- un échantillonnage minimum sur trois sites et/ou quinze échantillons est à prendre en considération ;

- les résultats statistiques avec une erreur à 95 % autour de la moyenne inférieure à 20° et un paramètre de groupement supérieur à 10 sont à espérer.

Si l'échantillonnage et le nombre de spécimens utilisés pour les calculs des directions moyennes et si les résultats statistiques correspondent au minimum aux valeurs indiquées ci-dessus, alors, les résultats ou pôles peuvent être considérés comme modérément fiables ou de catégorie « MagC ».

Les six premiers critères présentés ci-dessus sont ceux qui indiquent qu'une étude paléomagnétique a produit des résultats, certes criticables, mais utilisables.

En comparaison des critères applicables aux données du Phanérozoïque, ces critères peuvent apparaître comme peu contraignants, mais ce sont pourtant les critères minimums que l'on est en droit d'attendre des données actuellement obtenues sur des formations du Précambrien.

Catégorie « MagB »

Les six critères définis précédemment ont permis d'établir une qualité minimale des études paléomagnétiques. Pour que ces données puissent être considérées comme fiables, il est nécessaire que l'échantillonnage soit plus conséquent et aussi que les statistiques soit de meilleure facture :

- un échantillonnage minimum sur six sites et/ou trente échantillons est à prendre en considération ;

- les paramètres statistiques doivent être plus précis que pour le critère 6 avec une erreur à 95 % autour de la moyenne inférieur à 15° et un paramètre de groupement supérieur à 15.

Tout pôle passant les huit premiers critères peut donc être considéré comme représentatif du signal paléomagnétique enregistré par la roche étudiée et correspondre ainsi à la catégorie « MagB » ou fiable.

Catégorie « MagA »

Deux autres critères, pouvant potentiellement être obtenus pour chaque étude paléomagnétique, sont indispensables pour augmenter la confiance que l'on place dans les données disponibles :

- la réalisation de tests pouvant contraindre l'âge d'acquisition de l'aimantation, même de manière relative ;
- la caractérisation des porteurs de l'aimantation par des analyses de magnétisme des roches.

Les tests du pli et du conglomérat sont difficilement voire non réalisables sur des formations précambriennes. Cependant, toute donnée contrainte, même en âge relatif, par ces tests, pourra être considérée comme très fiable. D'autres tests peuvent être plus facilement réalisés sur des formations du précambrien.

La présence d'inversion, même si elle n'amènera pas au test d'inversion (McFadden et McElhinny, 1990), sera une indication que l'acquisition de l'aimantation a pu être suffisamment longue pour enregistrer des inversions du champ magnétique terrestre et donc probablement éliminer tout ou partie des effets de la variation séculaire. Le test du contact de recuit pourra indiquer un effet faible voire nul de formations intrusives tardives sur l'aimantation des roches étudiées.

L'autre information pouvant permettre de considérer une donnée comme très fiable est l'identification des porteurs de l'aimantation. Ceci est en effet indispensable à la confiance que l'on place dans l'origine primaire ou secondaire de l'aimantation. Il s'agit aussi d'une information clé pour la déduction de l'âge magnétique relatif à partir des informations sur les minéraux présents, leur température de blocage et la comparaison de ces données avec celles radiométriques disponibles.

Classification radiométrique des pôles paléomagnétiques (tabl. 1)

L'âge d'acquisition de l'aimantation est le facteur clé à évaluer pour toute utilisation de données paléomagnétiques pour des reconstructions paléogéographiques ou l'élaboration de chemin de dérive apparent du pôle (CDAP). Cependant, pour les périodes du Précambrien, il est indispensable de séparer cette contrainte radiométrique de celle, décrite précédemment, sur la qualité de l'étude paléomagnétique

proprement dite. En effet, ces deux informations sont distinctes l'une de l'autre et toute nouvelle datation ou toute nouvelle précision sur des âges de roches impliquera un changement de la confiance que l'on peut placer dans une donnée paléomagnétique existante.

La précision minimum requise sur l'âge des données paléomagnétiques, que ce soit pour des critères de fiabilité (Van der Voo, 1990) ou pour des classifications (Schmidt *et al.*, 1990), est la présomption que l'âge magnétique correspond à l'âge de la roche et que celui-ci doit être défini dans une période ou une demi-période ou à ± 40 Ma ou ± 4 %.

Il est évident que les notions de période ou de demi-période sont inadaptées aux formations du Précambrien et que ces barres d'erreurs numériques peuvent être soit trop petites soit trop importantes selon l'âge de la roche concernée.

Pour les roches du Précambrien, en dehors des roches volcaniques à refroidissement rapide, ce qui pourrait engendrer des problèmes de variation séculaire, l'âge de l'aimantation diffère généralement et systématiquement de l'âge de la roche étudiée.

Les roches plutoniques ou métamorphiques peuvent présenter des âges de cristallisation, des rajeunissement partiels ou totaux de l'âge initial. Ils correspondent surtout à des âges enregistrés par un minéral donné à une température donnée (e.g. : 850 ± 50 °C pour un zircon daté par la méthode Pb-Pb, $250-300$ °C pour une biotite datée par la méthode Ar-Ar). Le seul moyen de s'approcher au plus près de l'âge magnétique est d'avoir une vitesse de refroidissement de la roche étudiée que seules des approches multi-méthodes et sur différents minéraux pourront permettre d'atteindre.

L'idéal serait donc que 1) l'étude radiochronologique soit entreprise sur un échantillon prélevé sur le même lieu que l'échantillonnage paléomagnétique et 2) qu'elle soit basée sur une approche multi-méthode permettant de calculer au plus juste une vitesse de refroidissement pour mieux contraindre l'âge de l'aimantation avec ces informations et celles sur le porteur de l'aimantation.

Nous proposons ici une classification radiométrique des pôles ou données paléomagnétiques qui est fondée sur la disponibilité des âges, leurs précisions et aussi les possibilités de calculer ou de déduire des âges d'acquisition de l'aimantation.

Il ne s'agit pas d'une classification sur la qualité des études radiométriques mais uniquement sur l'utilisation que l'on peut en faire avec des données paléomagnétiques.

Sachant que les vitesses de dérive actuelles des continents sont de quelques cm/an, il est clair que la précision sur les âges sera primordiale pour des interprétations de dérive des continents. Par conséquent, ce sera cette précision qui sera l'élément majeur de la classification radiométrique.

Catégorie « AgeE »

L'absence de donnée radiométrique et donc de contrainte sur l'âge de la roche étudiée et du pôle obtenu correspond à cette catégorie « AgeE » ou non fiable.

Catégorie « AgeD »

La présence d'un âge, qu'il soit estimé ou relatif, mais de toute façon sans précision est un minimum pour que les données paléomagnétiques appartiennent à cette catégorie indicative ou « AgeD ».

Catégorie « AgeC »

Un âge peut être considéré comme modérément fiable si des informations radiométriques avec une précision minimum à ± 50 Ma sont disponibles.

Catégorie « AgeB »

Une précision de l'ordre de ± 25 Ma peut permettre de considérer une donnée paléomagnétique comme suffisam-

ment fiable en âge. Cette précision sur l'âge de la roche offre en effet 50 Ma de marge d'erreur sur l'âge de la roche, ce qui est a priori suffisant pour estimer l'âge magnétique même en l'absence de contrainte sur la vitesse de refroidissement. Un âge magnétique estimatif avec cette même marge d'erreur sera une contrainte supérieure pour une étude paléomagnétique.

Catégorie « AgeA »

Quelle que soit la précision sur l'âge radiométrique disponible, parfois quelques Ma seulement, cet âge sera toujours l'âge d'un minéral et non l'âge magnétique relatif, donc quelle que soit sa précision il correspondra à la catégorie précédente. En revanche les données paléomagnétiques peuvent être considérées comme très fiables du point de vue de leur contrainte radiométrique si l'utilisation de différentes méthodes sur différents minéraux a permis de déduire un âge magnétique relatif mais avec une précision de l'ordre de ± 10 Ma.