



HAL
open science

Des impacts d'astéroïdes ont-ils pu initier des points chauds et provoquer la dislocation de la Pangée

Gérard Lelièvre

► **To cite this version:**

Gérard Lelièvre. Des impacts d'astéroïdes ont-ils pu initier des points chauds et provoquer la dislocation de la Pangée. 2007. insu-00174802

HAL Id: insu-00174802

<https://insu.hal.science/insu-00174802>

Preprint submitted on 25 Sep 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Des impacts d'astéroïdes
ont-ils pu initier des points chauds
et
provoquer la dislocation de la Pangée ?**

Gérard Lelièvre

3 septembre 2007

1- Observatoire de Paris, GEPI, UMR 8111 : 1 Place J. Janssen, 92195 Meudon Cedex, France.

2- Mission des Ressources et Compétences Technologiques du CNRS, CNRS/MRCT/ UPS2274 :
1 Place A. Briand, 92195 Meudon Cedex, France.

Des impacts d'astéroïdes ont-ils pu initier des points chauds et provoquer la dislocation de la Pangée ?

Gérard Lelièvre

Observatoire de Paris, GEPI, UMR 8111 : 1 Place J. Janssen, 92195 Meudon Cedex, France.

et

Mission des Ressources et Compétences Technologiques du CNRS, CNRS/MRCT/ UPS2274 :

1 Place A. Briand, 92195 Meudon Cedex, France.

E-mail : gerard.lelievre@cnrs-dir.fr

A la mémoire de Albin et Germaine LELIEVRE

Abstract

Fifteen major meteorite impacts have hit the Earth between -90 My and -250 My and are reviewed. The purpose of this study is to check if they could have been involved in long-term and/or long distance geophysical effects. Using plate tectonic reconstructions, it appears that, in 11 out of these 15 cases, the original impact positions fall in the vicinity of hotspots or volcanic activities that developed later. In addition, four older impacts, with ages in the range -400 to -250 My, can also be associated with such volcanic events.

Moreover, if multiple impacts occurred within few hours, several systems of shockwaves were present at the same time in the crust, coming from different points and travelling in different directions. The waves would have interfered on well-defined loci and left their footprints in the lithosphere. These loci may have initiated the fragmentation of the crust and/or facilitated the outbreak of underlying mantle plume magma. Computations are developed for four events that may have occurred at critical dates in the history of the Earth: -250 My (3 impacts), -214 My (3), -145 My (2) and -90 My (2 impacts). The systems of interferences generated by these impacts reflect most of the break up lines in the Pangea/Gondwana and explain more than 100 000 km of existing rifts, trenches and shorelines. Typical geographical features are direct consequences of these interferences: The Caledonian channel, the Bathurst Inlet, the Rio de la Plata, etc. For all cases, the speed of seismic waves is found to be close to 6.4 km/s.

Combinations and relationships between all these effects (hot spots, interferences and magma plumes) could help understand the genesis and the outcome of major events such as the CAMP (-200 My), the Africa-South America separation (-135 My) and the North Atlantic Volcanic Province (-60 My).

This whole approach leads to several consequences or “predictions” to be verified:

- **Suggestions are made for The Hawaiian Island, the Siberian traps, and lake Qinghai.**
- **A global tectonic motion of North Africa should be involved in order to explain the 90° change of coastline direction in the gulf of Guinea.**
- **The 4000km-long Valles Marineris, on Mars, can also be explained by a double impact and gives a realistic image of effects which could have appended on Earth.**
- **Computations suggest that a fifth event have occurred in -128 My: in addition to the Tookoonooka crater, a second impact crater may exist, half-way between New Caledonia and New Zealand at position 173°E and 28°S.**

Table des matières

Introduction.

1. L'hypothèse des multi-clics.

- 1-1. Les hypothèses et leurs conséquences.
- 1-2. Le catalogue de cratères d'impacts d'astéroïdes.
- 1-3. Méthodologie de recherche des positions d'impact.

2. Simple clic : les points chauds.

- 2-1. Les impacts récents.
- 2-2. Les impacts plus anciens.

3. Les impacts multiples quasi-simultanés.

- 3-1. Calcul des interférences.
- 3-2. L'évènement de -145 Ma.
- 3-3. L'évènement de -90 Ma.
- 3-4. L'évènement de -214 Ma.
- 3-5. L'évènement de -250 Ma.
- 3-6. Dislocation de la Pangée.

4. L'enchaînement des évènements.

- 4-1. Séparation Amérique du nord - Afrique.
- 4-2. Séparation Amérique du sud - Afrique.
- 4-3. Ouverture de l'atlantique nord.

5. Conclusions.

5-1. Perspectives.

- Les familles d'astéroïdes
- Phénomènes d'interférences
- Points chauds
- Tectonique des plaques
- Extinctions massives

5-2. Trois cas spécifiques

- Le Nord de l'Afrique
- Mars : Valles Marineris.
- Prédiction d'un évènement passé, en -128 Ma !

Références et notes

Introduction

En contemplant une mappemonde, tout un chacun peut se poser des questions qui restent intrigantes et auxquelles il n'est pas apporté de réponses satisfaisantes ; le plus souvent c'est la notion du hasard «qui fait les choses» qui est invoquée.

Par exemple :

- Y a-t-il des raisons profondes pour que tant d'îles isolées soient le siège de volcans actifs (Hawaii, Kerguelen, etc.) ? Comment sont-ils nés, pourquoi à un endroit précis, à la suite de quelle cause ?

- Pourquoi les masses continentales et les rivages qui s'emboîtent comme un puzzle, ont-ils leurs formes actuelles ?

- Pourquoi la Pangée, qui était un continent unifié il y a 250 Millions d'années, s'est-elle brisée suivant les lignes géographiques que nous connaissons aujourd'hui ?

- Pouvons-nous présenter une description cohérente de l'histoire de notre planète avec les relations de causes à effets entre les grands phénomènes tels que : activité volcanique, fragmentation des continents, tectonique des plaques, impacts de météorites, carte stratigraphique et pour conclure avec les grandes extinctions de masse ?

Les impacts de grands astéroïdes libèrent des quantités considérables d'énergie en un temps très court et constituent les événements les plus puissants que la Terre ait eu à subir. L'étude des effets de ces chocs s'est généralement focalisée sur leurs conséquences immédiates et spectaculaires, synonymes de catastrophes, telles que : hiver nucléaire, déclenchement d'éruptions volcaniques (locales ou aux antipodes), tremblements de terre, tsunamis, ... afin d'aborder le sujet particulièrement prisé des grandes extinctions de masse (fin des dinosaures par exemple). Dans une approche complémentaire, on peut aussi s'interroger sur les conséquences, décalées dans le temps ou en distance, à la surface de la terre ou en profondeur, que ces impacts auraient pu générer. Cela revient à chercher des relations de causes à effets, ou des couplages, entre les impacts d'astéroïdes et des événements volcaniques ou géodynamiques à durée d'évolution lente. Cela concerne notamment l'émergence de points chauds, les traps, les fractures continentales, la tectonique des plaques ou d'autres phénomènes apparemment décorrélés des chutes d'astéroïdes.

C'est dans cette perspective que les impacts simples (partie 2) ou multiples (partie 3) sont ici passés en revue et que le concept de « multi-clics » (ou succession spatiale et/ou temporelle d'impacts) est utilisé comme fil conducteur pour tenter d'expliquer les causalités et de reconstruire l'interdépendance d'événements (partie 4) souvent considérés comme dus au hasard. La cinquième partie traite des perspectives et des prévisions qui découlent de cette approche.

1. L'hypothèse des multi-clics.

1-1. Les hypothèses et leurs conséquences.

Les quatre principes suivants, volontairement très généraux afin de garder le maximum de possibilités, servent de cadre pour essayer d'expliquer les causalités et l'enchaînement des événements qui se sont produits depuis le Cambrien :

1- Du point de vue de la systémique : La Terre est un système complexe, ouvert sur son environnement. Autrement dit, les causes qui ont conduit à l'évolution de la lithosphère ne sont pas uniquement internes mais peuvent aussi provenir de son environnement et en particulier des impacts d'astéroïdes.

2- Le déclencheur (simple clic) : Les impacts de météorites de taille et d'énergie conséquentes ($>10^{20}$ Joules) peuvent produire des effets qui affectent la Terre, localement ou à de grandes distances, en surface ou en profondeur.

Compte tenu des énergies mises en jeu, ces impacts doivent se traduire par des effets considérables. Les conséquences de ces impacts n'ont-ils pas laissé des traces, autres que les cratères des impacts originaux, et qui seraient encore visibles aujourd'hui ?

3- La propagation de l'énergie : Au point d'impact, une onde de choc est émise, en quelques secondes, et elle se propage en volume et/ou en surface.

4- Les actions à distances ou décalées dans le temps (multi-clics spatiaux temporels) : Compte tenu des constantes de temps dans le système terre, il est possible que les effets d'un impact viennent en interaction avec des phénomènes en cours d'évolution, provoqués (ou non) par un ou des impacts antérieurs, même localisés à de grandes distances. Ces interactions peuvent générer à leur tour des événements secondaires tout aussi «catastrophiques».

Les corollaires immédiats que l'on peut tirer de ces idées générales concernent des effets géophysiques importants dont les causalités restent encore incertaines. Les conséquences envisagées ci-dessous ne sont à ce stade que des hypothèses mais un test de validation, qui n'a pas la prétention d'être exhaustif, est suggéré dans chaque cas.

5 – La naissance de panaches et de points chauds (simple clic) : Un bolide supersonique heurtant la terre génère des hautes pressions dans la gamme 500-1000 MPa et des énergies de $3,7 \times 10^{20}$ J à $3,7 \times 10^{23}$ J pour des cratères ayant respectivement 20 km et 200 km de diamètre (1). Le choc affecte la croûte terrestre sur plusieurs km de profondeur. On peut penser que les perturbations se propagent à travers la croûte et le manteau. Elles pourraient ainsi créer des «anomalies locales» à diverses profondeurs et peut-être même jusqu'à la limite noyau-manteau, la couche D'', où sont localisées les sources profondes de plumes. Comme la montée du magma jusqu'à la partie supérieure du manteau peut nécessiter plus de 100 Ma, le chemin originel s'est trouvé perturbé ou a disparu :

- d'une part dans le manteau à cause des mouvements de convection
- d'autre part au travers de la lithosphère suite à la dérive des continents.

Cette absence de chemin de sortie peut favoriser la formation de panaches avec accumulation du magma. Celui-ci doit ensuite se frayer un nouveau chemin à travers la croûte (par lui-même ou sous l'action éventuelle d'une autre cause comme un deuxième clic

d'astéroïde par exemple) pour développer un volcanisme actif (point chaud, éruptions, traps, chapelets, failles, etc.).

Ces possibilités peuvent trouver leur confirmation en recherchant d'éventuelles présences de points chauds actuels, supposés immobiles, au voisinage des positions originelles de cratères d'impact. Ceci constituera le test n°1.

6 – La naissance de fractures (double-clic quasi-simultané) : Si 2 impacts d'astéroïdes se produisent à des distances appropriées et avec des décalages temporels adéquats, les ondes générées par chacun d'eux existent alors simultanément. Comme elles proviennent de points différents et avancent suivant des directions différentes, elles produisent des phénomènes d'interférence donnant lieu à des effets de distorsion dans la lithosphère sur des lignes bien définies. On doit retrouver trace de ces lieux géométriques malgré les dérives continentales. En particulier, ils peuvent être des endroits privilégiés où se propagent des fractures continentales et où émergent des éruptions volcaniques ultérieures.

Le test n°2 consiste à regarder les possibilités d'impacts multiples, à déterminer les lieux géométriques des interférences et à retrouver des formes caractéristiques de continents ou de failles de la géographie actuelle.

7 – La naissance de traps (multi clics décalés dans l'espace et dans le temps) : Si un impact ou une fracture se produit à proximité de point(s) chaud(s) arrivé(s) à maturation, il faut s'attendre à ce que cet endroit devienne privilégié pour une éruption majeure (ex: les traps).

Le test n°3 consiste à reconstruire des scénarios logiques mettant en évidence l'enchaînement de grands événements planétaires (impacts, fractures, points chauds, éruptions, tectonique).

8 - Les prédictions de nouveaux phénomènes :

Une théorie qui entend contribuer à donner une meilleure vision d'ensemble sur la causalité des événements se doit de pouvoir prévoir de nouveaux effets, de soulever de nouvelles questions, de remettre en cause éventuellement certaines idées et de tracer un nouveau cadre pour étudier le « comment » du processus de développement des événements.

Le test n°4 doit donc susciter ou proposer une ou des nouvelles pistes de recherches qui apporteraient des éléments décisifs en faveur de ces analyses puisqu'ils seraient fondés sur des prévisions. Des interrogations découlent naturellement de ces études et des hypothèses faites.

1-2. Le catalogue de cratères d'impacts d'astéroïdes.

Pour procéder à l'étude des différents tests annoncés, il faut constituer un ensemble cohérent de cratères d'impact. L'échantillon considéré ici contient tous les cratères connus ayant au moins 19 km de diamètre et dont l'âge se situe entre 90 et 700 Millions d'années (Ma). Il est établi à partir du catalogue compilé à l'Université du Nouveau Brunswick (2). Le recensement donne 24 cratères qui satisfont aux conditions choisies. Bien que ne répondant pas aux critères imposés par les spécialistes, deux cratères récemment découverts, l'un en Australie (3) et l'autre en Antarctique (4) sont ajoutés à la liste. La raison en est que, au vu des hypothèses sur leur âge et sur leur taille, ils pourraient avoir une contribution décisive dans les tests prévus. Les données sur les **26 cratères** sont rassemblées dans le **tableau 1**. Elles sont classées chronologiquement.

Par convention, tout au long du texte, les longitudes sont notées de 0° à 180° vers l'est et de 0° à -180° vers l'ouest ; les latitudes sont négatives pour les points dans l'hémisphère sud. Les coordonnées de points géographiques figurant dans le texte sont données dans l'ordre longitude puis latitude.

Tableau 1

Cratère d'impact	Lieu	Diamètre	Age	Coordonnées actuelles	
		(km)	(My)	Longitude	Latitude
Strangways	Territoire du nord Australie	25	646 ± 42	133,6	-15,2
Beaverhead	Montana, USA	60	~ 600	-113,0	44,6
Acraman	Australie méridionale	90	~ 590	135	-32
Lawn Hill	Queensland, Australie	18	> 515	138,6	-18,7
Glikson	Australie occidentale	19	< 508	121,6	-24
Presqu'Île	Québec, Canada	24	< 500	-74,8	49,7
Slate Island	Ontario, Canada	30	~ 450	-87,0	48,7
Sijan	Suède	52	376,8 ± 1.7	14,9	61,0
Woodleigh	Australie occidentale	40	364 ± 8	114,7	-26,1
Charlevoix	Québec, Canada	54	342 ± 15	-70,3	47,6
Clearwater	Québec, Canada	26 and 36	290 ± 20	-74,3	56,2
Ouest et Est					
-----	-----	-----	-----	-----	-----
Bedout	Australie occidentale	100 ?	250 ± 4.5	119,2	-18,3
Wilkes land	Antarctique	300 ?	250	120,0	-70,0
Araguainha	Brésil	40	244 ± 3.25	-53,0	-16,8
Saint Martin	Manitoba, Canada	40	220 ± 32	-98,6	51,8
Rochechouard	France	23	214 ± 6	0,9	45,8
Manicouagan	Québec, Canada	100	214 ± 1	-68,7	51,4
Obolon	Ukraine	20	169 ± 7	32,9	49,6
Puchezh-Katunki	Russie	80	167 ± 3	43,7	57,0
Morokweng	Afrique du sud	70	145 ± 0.8	23,6	-26,5
Gosses Bluff	Territoire du nord Australie	22	142.5 ± 0.8	132,3	-23,8
Mjolnir	Norvège	40	142 ± 2.6	29,8	73,8
Tookoonooka	Queensland, Australie	55	128 ± 5	142,9	-27,1
Carswell	Saskatchewan, Canada	39	115 ± 10	-109,5	58,5
Steen river	Alberta, Canada	25	91 ± 7	-117,7	59,5
Dellen	Suède	19	89 ± 2.7	16,8	61,8

Ces cratères sont divisés en 2 groupes, de part et d'autre de la date de -250 Ma. Ils seront traités séparément et avec des processus différents, en commençant par le groupe constitué par les cratères les plus récents. Cette limite n'est pas choisie artificiellement mais correspond à l'époque où la Pangée était un continent soudé depuis plusieurs dizaines de millions d'années ainsi qu'à la transition particulièrement importante entre le Permien et le Trias, contemporaine de la plus grande extinction de masse. On peut aussi prendre comme hypothèse initiale que c'est à partir de cette date que commence le mécanisme de fracture du continent. C'est également avant ce moment que les calculs de reconstructions des continents deviennent de plus en plus divergents suivant les auteurs. La limite inférieure de -90 Ma est choisie de façon à avoir une chance raisonnable pour qu'un point chaud actif ait eu le temps de se former, compte tenu du temps nécessaire de 100 Ma déjà mentionné ci-dessus.

1-3. Méthodologie de recherche des positions d'impact.

La question est maintenant de calculer, à l'aide d'un logiciel de tectonique des plaques, les trajectoires suivies par les cratères au cours du temps, afin de retrouver la position de l'impact initial. Après différentes comparaisons, c'est le programme disponible en ligne sur le site Internet de ODSN (Brême, Allemagne) qui a été retenu (5). Il permet de faire deux séries de calculs différents fondés sur deux systèmes de référence liés à des séries de points chauds (6,7). Ceci assure les meilleures reconstructions entre l'époque actuelle et la date charnière de -150 Ma. Ceci permet aussi une inter comparaison des résultats et donc d'avoir une idée de la précision obtenue sur les positions reconstituées. L'accord entre les deux modes de calculs est satisfaisant si l'on se contente d'une précision de l'ordre de 5°.

Dans le détail et pour des résultats plus précis, on constate des effets systématiques entre les 2 modes de calculs qui dépendent des endroits de localisation sur la Terre, sans pour autant savoir lequel privilégier. Les causes d'incertitudes sont de 2 ordres : d'une part ces reconstructions supposent que les points chauds soient fixes, ce qui n'est pas nécessairement acquis selon plusieurs auteurs travaillant sur le sujet (un exemple en 8). Des écarts de 5 à 10° ont été constatés sur plusieurs points chauds (Réunion, Hawaii, Marion) dans des durées comparables à celles qui nous concernent ici. D'autre part, l'émergence des points chauds à la surface de la Terre peut éventuellement se produire à plusieurs centaines de km du lieu d'impact, compte tenu de la taille des panaches magmatiques (supérieurs à 1000 km) issus des couches profondes du manteau. Au final, il ne faut donc pas espérer de précisions meilleures que 5°.

Malheureusement, cet outil de calcul ne permet pas de reconstitutions pour des périodes antérieures à -150 Ma à cause du renouvellement des fonds océaniques qui ont effacé les indices utilisés. Les extrapolations vers des dates plus anciennes doivent utiliser les données fournies par le paléomagnétisme. Mais une difficulté majeure apparaît car les reconstitutions de l'agencement des plaques proposées par différents auteurs conduisent à de grandes divergences entre elles. De plus, elles se raccordent mal avec la méthode des fonds de mer à la date charnière de -150 Ma. Les différences sont surtout en longitude, mais aussi en latitude ou en rotation. A fortiori pour les dates plus anciennes les différences s'accroissent et deviennent largement incompatibles (par exemple 60° d'écart sur les longitudes « absolues »).

Pour contourner cette difficulté, il semble préférable de faire confiance aux positions calculées en -150 Ma par le programme ODSN, puis à partir de là, d'utiliser les directions des mouvements différentiels obtenus par le paléomagnétisme plutôt que de se fier aux coordonnées absolues. C'est une manière de corriger les effets systématiques et de reporter au deuxième ordre les écarts constatés entre les auteurs. D'autant plus que le moment où la Pangée était totalement unifiée n'est plus très loin (si l'on place vers -190 Ma le début des mouvements tectoniques). A partir de ce moment et vers les dates encore plus négatives, on va considérer les masses continentales comme un seul bloc (jusque vers -360 Ma environ) ce qui implique que le type de reconstruction devrait être indifférent, une fois corrigés les décalages « systématiques ».

2. Simple clic : les points chauds.

2-1. Les impacts récents.

Pour chaque cratère plus jeune que -150 Ma, il est possible de calculer les positions effectives des impacts par les 2 modes de calcul ODSN. Le **tableau 2** donne la position moyenne de ces 2 résultats, ainsi que les positions cataloguées des points chauds les plus proches. La dernière colonne mentionne la distance entre l'impact et le point chaud. Les résultats sont aussi visuellement traduits par des points jaunes sur la **figure 1**.

Tableau 2

	Position lors de l'impact		Point chaud / volcan			Distance	
	Long.	Lat.		Long.	Lat.		
Morokweng	-0,4	-50,2	Meteor	2	-54	250	km
Gosses Bluff	99,4	-52,7	?				
Mjolinir	6,1	57,9	NAVP	?	?	< 500	km
Tookoonooka	113,6	-56,8	?				
Carswell	-57,6	51,5	?				
Steen River	-69,3	62,6	?				
Dellen	9,8	50,6	Eifel	7,0	50,0	200,0	km

Pour les cratères dont la datation est entre -150 et -250 Ma, le **tableau 3** donne la position moyenne des 2 résultats de calcul ODSN en -150 Ma. La position des points chauds suggérés par les mouvements des plaques est donnée en comparaison ainsi que la distance restant éventuellement à parcourir.

Tableau 3

	Position du cratère en -150 Ma		Point chaud / volcan			Distance	
	Long.	Lat.		Long.	Lat.		
Bedout	84,5	-40,4	Amsterdam	77	-37	647	km
Wilkes	72,7	-59,5	Kerguelen	69	-49	1400	km
Araguainha	-19,0	-30,1	Tristan	-12	-37	1000	km
St Martin	-43,1	32,8	Great Meteor	-32	28	1160	km
Rochechouart	3,5	26,5	Hoggar	6	23	470	km
Manicouagan	-21,9	29,3	Canaries	-20	28	500	km
Obolon	25,6	37,7	Théra	25	36	150	km
Puchezh	28,1	47,3	?				

Sur la **figure 1**, les points verts marquent les positions en -150 Ma, les points chauds sont en rouge et les flèches rouges traduisent les distances résiduelles à combler pour retrouver l'impact originel.

Sur l'échantillon considéré de 15 cratères, 10 peuvent être raisonnablement reliés à une activité volcanique de surface qui s'est développée longtemps après l'impact. Les extrapolations entre -150 Ma et la cible finale sont compatibles avec les trajectoires calculées. Elles ne portent que sur des distances relativement modestes (quelques centaines de km à 1400 km dans le cas extrême de Kerguelen/Heard). Dans ce cas précis, c'est la position des îles Kerguelen qui est prise en compte. Cependant certains auteurs (9) situent le point chaud beaucoup plus au sud (Ile Heard ou encore plus loin), en s'appuyant sur la chronologie des éruptions sur le plateau des Kerguelen. Ce serait plus favorable pour la présente étude. La

raison en est que l'on cherche des limites supérieures à ces distances afin de les comparer aux incertitudes mentionnées précédemment et qui sont de l'ordre de 5°.

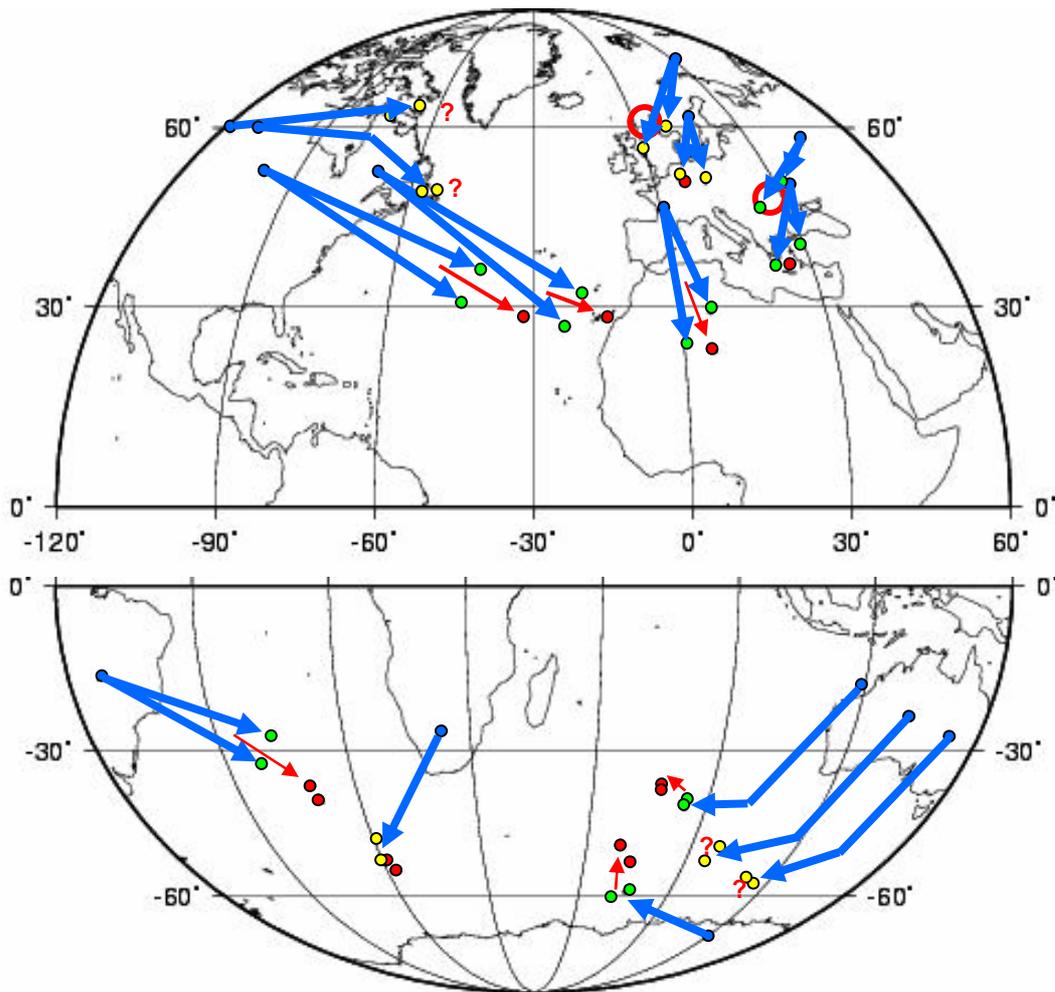


Fig. 1. Positions relatives des cratères à $t = 0$ (points bleus). Les trajectoires temporelles (flèches bleues) conduisent à la position originelle (points jaunes) ou à la position à -150 Ma (points verts). Les flèches rouges traduisent le chemin restant à parcourir avant de rejoindre le plus proche point chaud (point rouge). Carte ODSN actuelle.

On notera que ce sont surtout les cratères les plus jeunes qui ne donnent pas de points chauds correspondants. Cela suggère que ceux-ci n'ont pas été initiés ou ne sont pas arrivés à une maturité détectée. Le cas du cratère de Puchezk Katunki est singulier, c'est le seul parmi les grands cratères anciens à ne pas conduire à une suggestion de contrepartie volcanique. Nous examinerons cet aspect à l'occasion de l'ouverture de l'Atlantique Nord (paragraphe 4-3) en relation avec les tomographies thermiques à 500 km de profondeur.

Le grand nombre de coïncidences révélées par cette étude apparaît significatif surtout si on le compare aux probabilités pour que ces cas soient uniquement dus au hasard. Par exemple, si l'on attribue une surface de 100 000 km² à chacun des 50 points chauds et à 50 impacts (estimation pour tenir compte du fait que nombre d'astéroïdes ont pu tomber dans les océans), la probabilité pour qu'une portion de Terre de 100 000 km² (sur un total de 500×10^6 km²) héberge **simultanément** un point chaud et un impact est seulement de 10^{-4} .

Ce chiffre implique que l'effet dû au hasard est hautement improbable pour expliquer les 10 occurrences trouvées sur 15 cas.

2-2. Les impacts plus anciens.

Entre -700 Ma et -250 Ma, 11 impacts de météorites sont recensés (**tableau 1**). Les datations des impacts deviennent de plus en plus incertaines et les reconstructions des positions passées de plus en plus disparates, surtout si l'on se fie aux coordonnées géographiques absolues. Comme proposé ci-dessus, on se propose de remonter le temps, pas à pas, d'un impact à l'autre en s'appuyant sur les mouvements relatifs proposés par le paléomagnétisme.

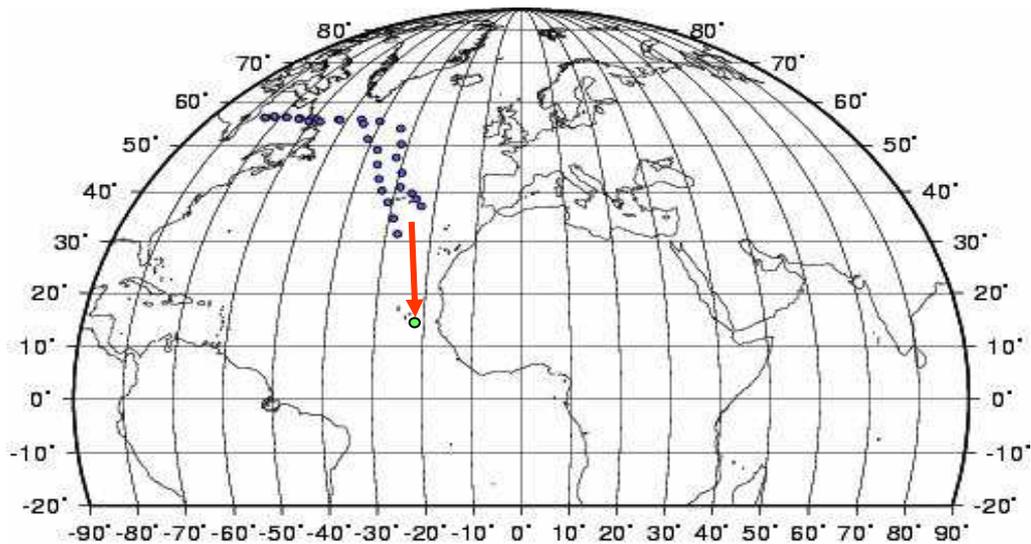
Comme 4 cratères d'impact sont situés dans l'hémisphère nord, il est raisonnable de prendre comme premier point, le cratère de Manicouagan en le plaçant aux îles Canaries en -214 Ma. Le cratère immédiatement précédent (Clearwater) est alors situé vers -25° et 33° . Entre -214 et -290 Ma, la dérive continentale selon les cartes de Scotese est 18° en longitude et de 16° à 23° en latitude. La **Figure 2a** retrace le trajet suivi par les cratères de Clearwater depuis l'impact.

L'impact de Clearwater apparaît tout à fait compatible avec les Iles du Cap Vert (siège d'un point chaud) en ce qui concerne la latitude mais cependant avec un décalage de 13° environ en longitude. Comme ce sont les longitudes qui sont les plus divergentes entre les différents auteurs, nous appliquons donc cette correction de 13° pour faire coïncider l'impact et le point chaud. Ceci permet de continuer la remontée dans le temps. Partant de ce nouveau point, avec le même processus qui est matérialisé par les vecteurs rouges sur la **figure 2b**, on peut estimer les positions des impacts plus anciens :

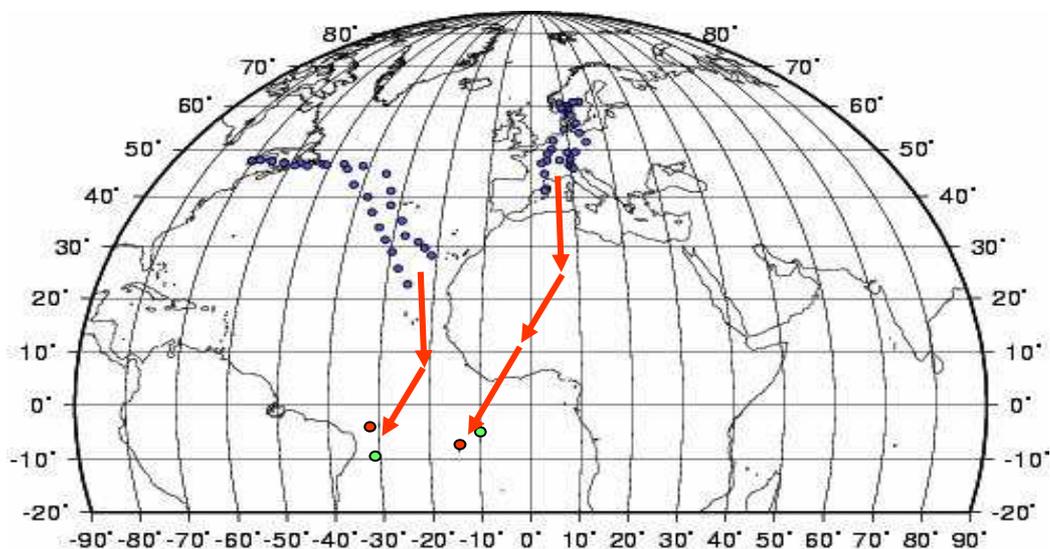
- En -342 Ma, la position d'impact pour le cratère de Charlevoix est estimée à -31° , -10° , ce qui est très proche du point chaud de l'île Fernando de Noronha (-32° , -4°), soit 670 km.

- En -377 Ma, celle du cratère de Sijan est estimée à -10° , -6° ce qui est à comparer aux coordonnées de l'île Ascension (-14° , -8°), soit 500 km, et qui est aussi un point chaud répertorié.

Pour chaque impact, les écarts entre l'impact originel et le point chaud actuel sont compatibles avec les incertitudes les plus favorables qui ont été estimées ci-dessus. Ainsi, la méthode de la « courte échelle », telle qu'elle a été mise en œuvre, se trouve confortée par ses propres résultats puisqu'elle a permis de trouver 3 coïncidences antérieures de 80, 130 et 167 Ma à l'impact de Manicouagan pris comme référence. Le **tableau 4** regroupe les résultats. Comme on va le voir plus loin, ces identifications lointaines dans le temps vont permettre de reconstituer l'enchaînement des catastrophes successives qui ont abouti aux éruptions du CAMP (Central Atlantic Magmatic Province).



0 Ma Reconstruction



0 Ma Reconstruction

Fig. 2a et 2b. Reconstitution des chemins parcourus par les cratères d'impact de Clearwater (en haut) et de Sijan et Charlevoix (en bas). Les points bleus correspondent aux points calculés entre 0 et -150 Ma. Les vecteurs rouges sont les tracés successifs inspirés des reconstructions fondées sur le paléomagnétisme et en tenant compte de la correction d'effet systématique de 13° en longitude. Les points verts sont les positions calculées et les points rouges correspondent aux points chauds les plus proches. Cartes ODSN actuelles.

La méthode précédente ne peut s'appliquer à la reconstitution de la position de l'impact de Woodleigh, sur la côte ouest de l'Australie, daté de -364 Ma. En effet, il n'y a pas d'étape intermédiaire entre -250 Ma et -364 Ma pour servir de relais dans cette région du globe. En utilisant simplement la carte de Scotese, la position du cratère serait voisine de (105° ; -33°) ce qui est compatible avec le plateau de Broken Ridge (100° ; -30°), même avec une correction globale de 13° comme appliquée plus haut. Les échantillons de basalte tirés des forages ODP 1141 et 1142 laissent penser que l'éruption s'y est produite en -95 Ma (9). Elle a entraîné la chaîne sous-marine qui s'étend jusqu'aux îles Andaman et à la Birmanie. Le point chaud qui devrait y être associé ne figure toutefois pas dans les listes de ceux qui sont déclarés actifs actuellement.

Tableau 4

Impact	Age	Point chaud suggéré
	(Ma)	
Strangways	646 ± 42	?
Beaverhead	~ 600	?
Acraman	~ 590	Hawaii
Lawn Hill	> 515	?
Glikson	< 508	?
Presqu'Île	< 500	?
Slate Island	~ 450	?
Sijan	376.8 ± 1.7	Ascension
Woodleigh	364 ± 8	Broken Ridge
Charlevoix	342 ± 15	Fernando de Noronha
Clearwater Ouest et Est	290 ± 20	Cap Vert

Pour les impacts encore plus anciens, il ne serait pas réaliste de proposer des corrélations à ce stade. En effet, avant -380 Ma, la Pangée se trouve dans une phase de regroupement des plaques. La méthode employée pour traiter un continent soudé, ne peut plus s'appliquer à des morceaux de plus en plus éparpillés. Il n'est d'ailleurs pas évident que les morceaux qui ont constitué la Pangée soient comparables à ceux qui ont existé après sa fracture. Toutefois, un certain accord semble exister vers -600 Ma entre différentes reconstructions : l'Australie est généralement placée dans la région des Iles Hawaii si bien que le cratère d'impact d'Acraman (-590 Ma), aurait une bonne chance, à 1000 km près, d'être l'ancêtre du point chaud des Iles Hawaii (**Figure 3**).

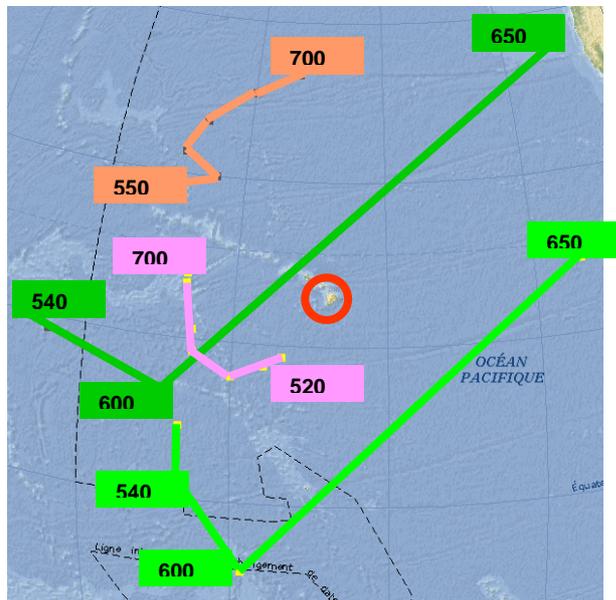


Fig. 3. Deux reconstructions pour les cratères d'Acraman (-590 Ma) en rose et Strangways (-646 Ma) en orange et vert foncé aux environs des Iles Hawaii respectivement selon Scortese (10) et l'University of Texas, Institute of geophysics (11).

Avec 15 possibilités de voisinage proche concernant des impacts individuels et des points chauds, on peut considérer que le premier test envisagé est très satisfaisant, validant ainsi l'idée que des impacts peuvent être une cause d'anomalie profonde, génératrice ultérieurement de point chaud, de panache ou d'éruption.

3. Les impacts multiples quasi-simultanés.

3-1. Calcul des interférences

L'idée de la production d'interférences à l'échelle planétaire qui constitue le test n°2 est une extension de phénomènes locaux déjà bien étudiés. C'est le cas par exemple du tremblement de terre de San Francisco en 1989 où certains quartiers de la ville (Oakland et La Marina) ont été plus détruits que d'autres, suite à des interférences entre ondes sismiques. C'est également le cas du Tsunami de Hilo (Hawaii) en 1960 où la configuration locale de la baie a créé des interférences qui ont amplifié les phénomènes et donc aggravé la dévastation de la ville.

Dans le cas présent, on va considérer des ondes issues de 2 ou plusieurs impacts qui se sont produits dans de courts intervalles de temps (minutes ou heures) et essayer d'en retrouver les effets à l'échelle planétaire. En examinant la partie inférieure du **tableau 1** (impacts postérieurs à -250 Ma), on peut se demander si les impacts d'âge comparable (et compatibles, compte tenu des barres d'erreur) ne pourraient pas provenir d'un corps parent unique qui se serait brisé avant de percuter la terre. La comète Shoemaker-Levy 9 tombée fragmentée sur Jupiter en 1994 pourrait constituer un exemple de référence. Mais, compte tenu de sa petite masse, les effets de marée que la Terre peut produire semblent trop faibles pour entraîner la formation de morceaux tombant à grande distance les uns des autres. Il faut plutôt penser à des familles d'astéroïdes qui se seraient constituées avant d'arriver dans le voisinage terrestre. Les simulations effectuées par Michel et al. (12,13) au niveau de la ceinture d'astéroïdes sont une possibilité intéressante pour produire des impacts quasi simultanés assez distants à la surface de la Terre.

Plusieurs impacts multiples provenant d'une même famille peuvent être envisagés :

-250 Ma : Bedout, Wilkes et Araguainha peuvent constituer un système triple,

-214 Ma : Rochechouard, Manicouagan et Saint Martin sont également en configuration idéale pour être aussi un système triple.

-145 Ma : Morokweng et Gosses Bluff peuvent constituer un double impact ; et même triple si l'on ajoute l'impact de Mjolnir. Ce dernier impact ne sera pas considéré car il ne conduit pas à des possibilités intéressantes dans les combinaisons avec les deux autres.

-90 Ma : Steen River et Dellen réunissent aussi les conditions d'un impact double.

Les conséquences cinématiques des quatre configurations vont être détaillées ci-dessous en utilisant la même méthode et le même processus de calcul, à l'aide d'un programme informatique de calculs des lieux d'interférences.

Si un premier impact se produit en un point A, suivi d'un second impact en un point B, il y aura interférences constructives en un point M si, en ce point, les 2 ondes émises par les sources A et B arrivent au même instant. En supposant constantes les vitesses des ondes, cela revient à chercher le lieu des points M tels que $MA = MB + K$ où K est une constante représentant la distance parcourue par les ondes issues de A au moment du deuxième impact en B. Ce calcul, simple dans un plan infini, se complique ici puisqu'il s'agit de projeter une sorte d'hyperbole sur une sphère. De plus, les ondes issues de A peuvent avoir parcouru un ou

plusieurs tours de Terre avant que se produise l'impact en B. Enfin, il faut tenir compte du fait que ces ondes reviennent des antipodes après un demi-tour. Il peut donc y avoir des interférences sur les 2 chemins, soit en partant de l'impact soit au retour des antipodes, pour chacun des 2 systèmes d'ondes.

Le processus de calcul est le suivant : grâce au test n°1, on connaît les coordonnées des impacts; la différence de longitude et la vitesse de rotation de la terre, donne une approximation suffisante de l'intervalle de temps entre les impacts ; partant de ces données, on calcule les temps correspondants aux passages des ondes, à l'aller et au retour, pour chaque point de la terre, avec une résolution de 1°. Puis on compare automatiquement les différents tableaux de passage des ondes issues des 2 impacts. On considère qu'une interférence sera constructive en un point, si, les 2 ondes ne sont pas séparées de plus de 10 s (temps également ajustable pour faciliter la visualisation des interférences). La vitesse des ondes reste une variable ajustable. Pour commencer, on peut faire un balayage rapide avec des vitesses comprises entre 5,5 et 8 km/s, afin d'être dans des zones de vitesses typiques de celles des ondes sismiques. Lorsque les lieux géométriques obtenus dans ce balayage révèlent des coïncidences avec des figures géographiques caractéristiques, la valeur de la vitesse est affinée. Les vitesses qui sont données dans les cas particuliers ci-dessous correspondent au meilleur ajustement.

Ces calculs restent purement cinématiques, sans effets d'atténuations, de pertes d'énergie ou de vitesse, sans aucune considération globale ou locale d'homogénéité ou d'hétérogénéité des milieux traversés qui pourraient retarder les ondes. C'est donc la vitesse moyenne de l'évènement qui est donnée. Les cartes qui seront utilisées sont celles d'ODSN pour les évènements postérieurs à -150 Ma. Pour les autres, la Pangée est un continent compact et nous avons choisi les cartes de Scotese (10) pour raison de commodité.

Les quatre cas identifiés sont traités individuellement ci-dessous. Dans la dernière partie, un cinquième cas sera rajouté, comme une conséquence et une prévision induites par cette théorie.

3-2. L'événement de -145 Ma.

C'est l'analyse de ce premier cas, particulièrement favorable, qui a conduit à énoncer les idées précédentes et à suggérer les différents tests. Cet événement correspond aux meilleures conditions de datation, d'identification et de précision pour faciliter les calculs de reconstitution, entièrement conduits avec le programme ODSN.

Après avoir tracé un cercle centré sur le cratère de Morokweng et tangent à la côte S-E de l'Afrique (en rouge sur la **figure 4a**), l'idée est apparue qu'il pourrait être considéré comme le cercle osculateur au sommet d'une pseudo hyperbole (schématisée en bleu) qui serait le résultat de la combinaison de 2 impacts distincts. Le vecteur en noir indique donc la direction approximative vers où chercher le deuxième contributeur à ce phénomène. Cette direction doit être reportée dans le contexte de l'époque. La carte ODSN en -145 Ma (**figure 4b**) est utilisée en projection polaire; le rayon vecteur suggéré est naturellement l'arc de grand cercle passant par chacun des deux impacts. C'est donc avec une certaine surprise que, dans cette direction, on rencontre le cratère de Gosses Bluff, en Australie, situé à 6382 km et ayant un âge ($142,5 \pm 0,8$ Ma) parfaitement compatible avec celui du cratère de Morokweng ($145 \pm 0,8$ Ma).

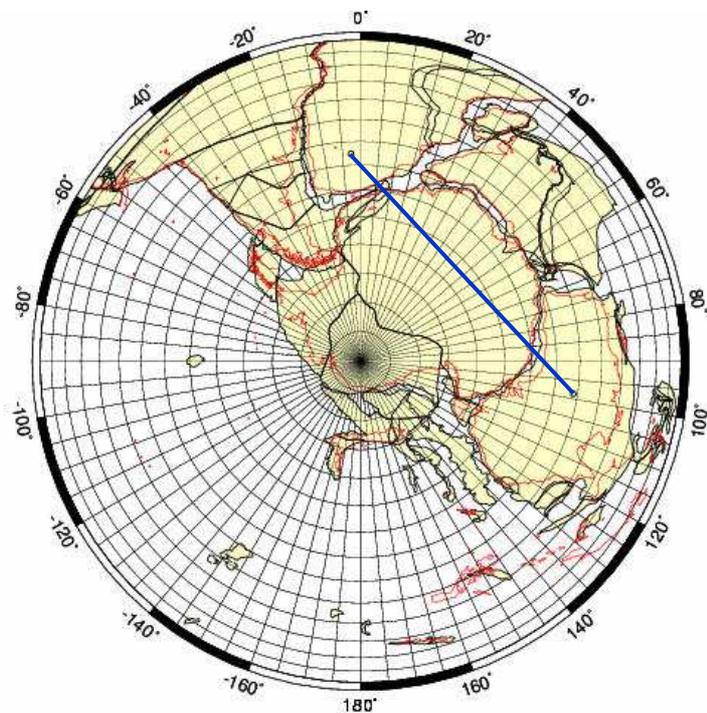
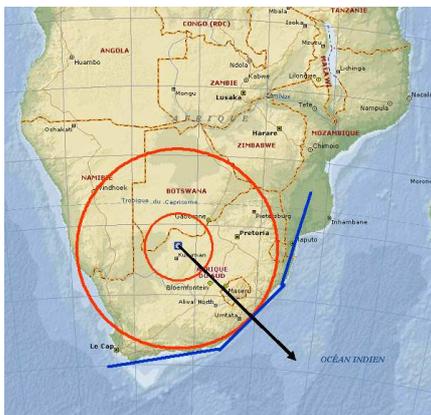


Fig. 4a et 4b. Impacts de Morokweng et Gosses Bluff. A gauche, le cercle osculateur (rouge), le schéma (bleu) des interférences et l'arc de grand cercle (noir) vers Gosses Bluff. A droite, les positions relatives des 2 impacts sur la carte ODSN.

145.0 Ma Reconstruction

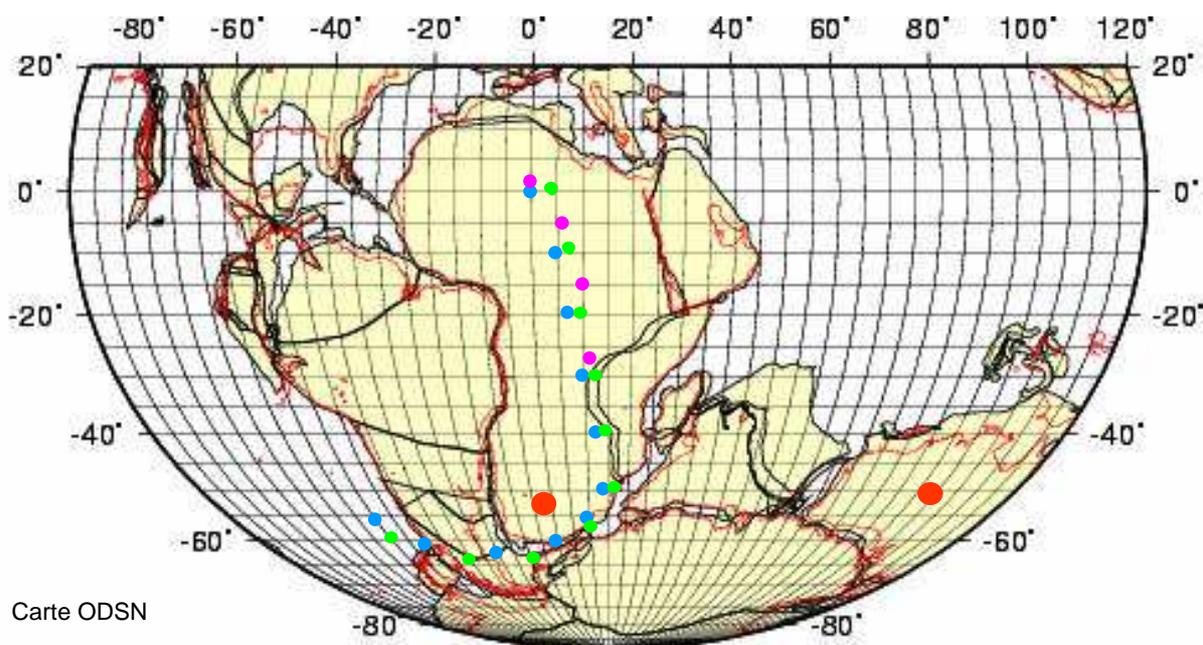
La différence de longitude entre les 2 impacts permet, grâce à la vitesse de rotation de la Terre, de calculer l'intervalle de temps entre les deux impacts : 6,766 heures. Le sommet de la pseudo hyperbole est le point de début du phénomène d'interférence. Il se situe à 900 km de Morokweng. La distance parcourue en 6,766 h par l'onde émise à partir de Gosses Bluff, à $T = 0$, sera : $6382 - 2 \times 900 + n$ fois 40 045 km, où n le nombre n de tours de Terre. Pour des valeurs de n variant de 0 à 5, les vitesses des ondes pouvant interférer en ce point initial sont : 0,189 1,833 3,477 5,121 6,765 8,409 km/s. Le choix de $n = 4$ semble le plus approprié car il correspond à des vitesses sismiques connues par ailleurs. Cette valeur de n peut paraître élevée mais rappelons que les ondes sismiques consécutives à l'éruption du

Krakatoa ont effectué cinq fois le tour de la Terre, alors que ce cataclysme était 1000 ou 10000 fois moins énergétiques que ceux de ces impacts.

Ce calcul empirique qui est la traduction de l'apparition d'interférences entre 2 impacts quasi-simultanés est repris avec le programme de calcul automatique des lieux d'interférence avec les données initiales suivantes :

Position du premier impact, Gosses Bluff :	98,8° -50,8°
Position du deuxième impact, Morokweng :	-2,7° -52,6°
Intervalle de temps entre les impacts :	6,767 h

Le calcul des interférences redonne évidemment les valeurs de vitesses mentionnées précédemment. Sur la **figure 5**, on a porté les lieux géométriques correspondant aux vitesses 6,76 km/s (points bleus) et 6,77 km/s (points verts) afin d'illustrer la sensibilité au choix de la vitesse. La ligne obtenue longe une faille en Patagonie avant de contourner l'Afrique du sud. Elle passe ensuite par les grands lacs africains (Malawi, Tanganyika, Kivu, ...). Elle se prolonge le long de la faille conduisant au Darfour avant de rejoindre l'Ennedi, le Tibesti et le Hoggar. Il est remarquable que cette ligne passe par les 4 volcans actifs (dont 3 points chauds répertoriés) du centre du continent africain. La ligne obtenue s'étend donc sur plus de 10200 km et suit des caractéristiques géographiques avec une précision meilleure que 300 km, sur toute la longueur.



145.0 Ma Reconstruction

Fig. 5. Système d'interférences créé par les impacts de Gosses Bluff et Morokweng (points rouges). Les points bleus et verts correspondent à des ondes de vitesses respectivement de 6,76 et 6,77 km/s. Les points roses matérialisent les positions de 4 volcans actifs (Nyiragongo, Darfour, Tibesti et Hoggar, du Sud au Nord). Carte ODSN.

Aux antipodes, sur la **figure 6**, le calcul laisse prévoir un effet d'interférence pour la même valeur de la vitesse d'onde. Ces interférences coïncident avec les fosses du Pacifique, à condition de reconstituer leurs positions en -145 Ma en leur attribuant les mouvements de la plaque nord américaine. Sur plus de 3000 km, la ligne obtenue suit les fosses du Japon, des Bonin, Mariannes et Yap. Là aussi, l'accord est meilleur que 300 km, sauf vers le sud où des mouvements tectoniques ultérieurs ont pu perturber cette géométrie linéaire (peut-être suite à la montée vers le Nord de la plaque australienne, ou à la poussée de la plaque des Philippines).

Cette association entre interférences et zones de subduction est tout à fait inattendue. Ce point mérite attention au cas où l'on retrouverait de telles similitudes dans d'autres cas.

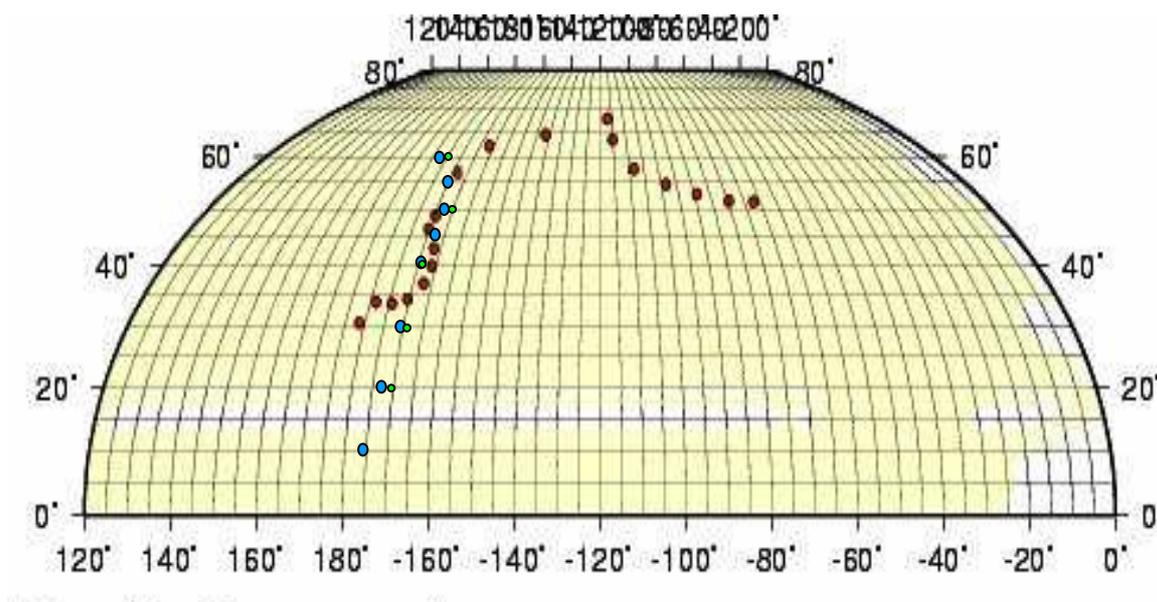


Fig. 6. Effets aux antipodes. Les points rouges marquent les positions reconstituées des zones de subduction. Les points bleus correspondent à $v = 6,77$ km/s.

La chronologie de l'événement est résumée dans le **tableau 5**

Tableau 5

T0 = 0 s	Impact à Gosses Bluff
T1 = 24357 s	Impact à Morokweng
T1 + 117 s	Début d'interférence sur la côte d'Afrique du Sud
T1 + 359 s	Interférences sur la côte pacifique du Chili (fin)
T1 + 866 s	Interférences au Hoggar (fin)
T1 + 3093 s	Antipodes, fosse du Japon (début)
T1 + 3361 s	Antipodes, Sud des îles Mariannes (fin)

Comme il apparaît sur ce tableau, en moins d'une heure après le deuxième impact, les empreintes de la combinaison des 2 impacts sont gravées dans la croûte terrestre.

3-3. L'évènement de -90 Ma.

Les deux bolides responsables de l'évènement sont de taille modeste et les positions d'impact directement calculable avec le programme ODSN. Les données de calcul des interférences sont :

Position du premier impact, Dellen :	6,74°	50,94°
Position du deuxième impact, Steen River :	-71,98°	61,42°
Intervalle de temps entre les impacts :	5,248 h	(4694 km)

Pour une vitesse d'onde de 6,195 km/s, une courbe de 4000 km apparaît entre la mer d'Irlande et la mer de Kara (**Figure 7**). Le phénomène d'interférence commence sur la côte la plus occidentale du Groenland qui est très découpée, puis se propage en deux branches à des vitesses de l'ordre de 11 km/s. Au nord, il passe par « Voring Basin » puis il longe les îles Lofoten, les côtes norvégiennes, le Cap Nord et la presqu'île de Kola avant de rejoindre la mer de Kara. Au sud, il longe les îles Shetland et les îles Orcades, coïncide avec le canal calédonien sur 200 km (**Figure 8**) et se termine en mer d'Irlande.

La partie ouest du système d'interférence, sur plus de 4500 km correspond au retour des ondes générées par les 2 impacts ; le phénomène commence d'une part sur les côtes nord de l'Alaska, et d'autre part du côté du lac Winnipeg. Puis, les 2 branches d'interférences se rejoignent dans le nord du Canada, dans la grande baie de Bathurst Inlet. Cette baie, rectiligne (**Figure 9**) sur plus de 350 km et sans contribution de fleuves importants rappelle étonnement la structure du canal calédonien mentionnée ci-dessus. Le lieu obtenu sépare manifestement les parties continentales et insulaires de l'extrême nord canadien.

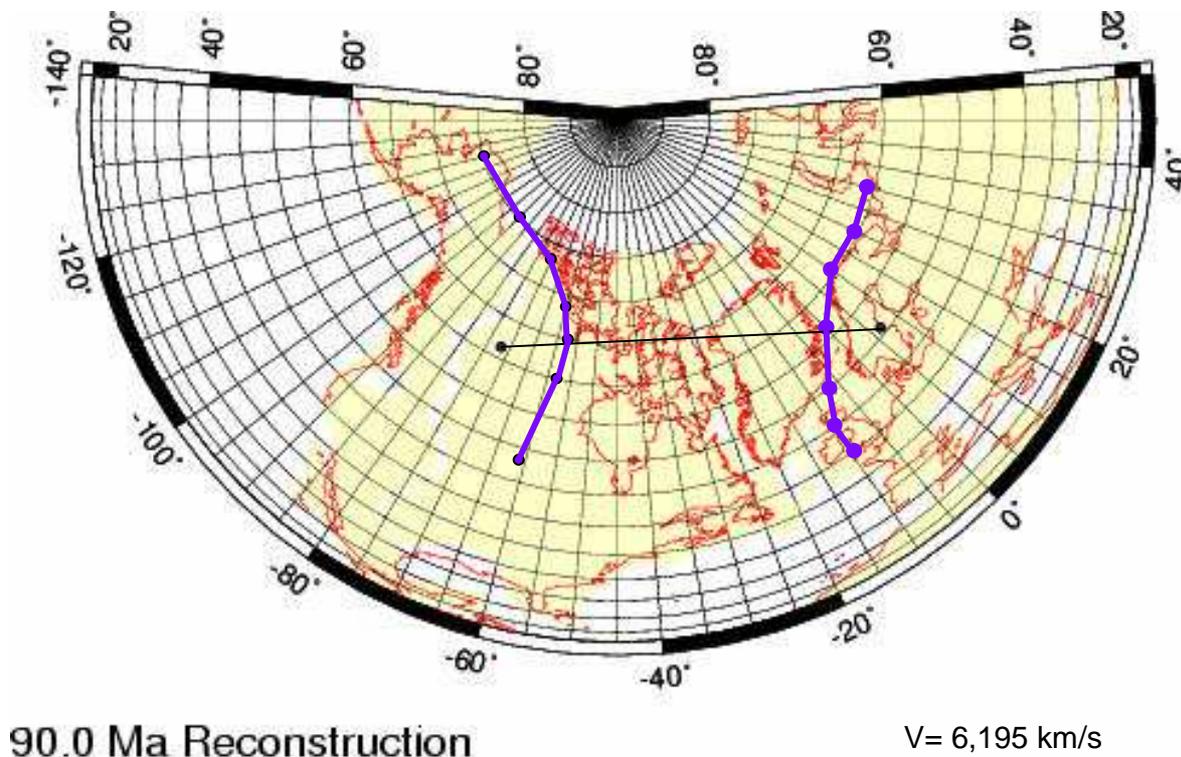


Fig. 7. Interférences produites par les impacts de Dellen et de Steen River sur la carte ODSN en -90 Ma (vitesse des ondes = 6,195 km/s).



Fig. 8. Interférences le long des 200 km du canal calédonien en Ecosse.

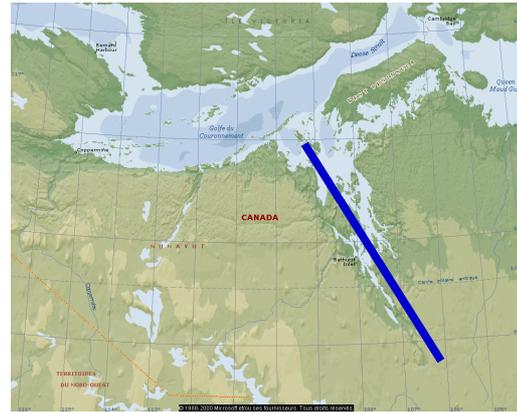


Fig. 9. Interférences sur les 350 km de Bathurst Inlet, Nunavut, Canada

La chronologie de l'événement est résumée dans le **tableau 6**.

Tableau 6

T0 =	0 s	Impact à Dellen
T1 =	18894 s	impact à Steen River
		<i>Onde 1, 3ème tour, aller et onde 2, 1er tour, aller</i>
T1 +	643 s	Début d'interférence sur la côte du Groenland : 0°, +56°
T1 +	777 s	Mer d'Irlande (fin) : -9°, +40°
T1 +	788 s	Mer de Kara (fin) : +30°, +61°
		<i>Onde 1, 3ème tour, retour et onde 2, 1er tour, retour</i>
T1 +	6079 s	Côte nord de l'Alaska (début) : -120°, +75°
T1 +	6197 s	Lac Winnipeg, Manitoba (début) : -61°, +48°
T1 +	6324 s	Bathurst Inlet, Nunavut (fin) : -57°, +65°

L'accord entre les positions d'interférences et les lieux géographiques caractéristiques est de l'ordre de 200 km au maximum, ce qui est très compatible avec les précisions attendues.

Cette combinaison d'impacts précède de 30 Ma le processus de l'ouverture de l'océan atlantique nord. Aurait-elle pu contribuer au découpage de la lithosphère ? L'ouverture de l'Atlantique nord paraît particulièrement complexe avec des effets imbriqués et cumulés ; il devrait impliquer plusieurs impacts, des événements volcaniques (NAVVP pour North Atlantic Volcanic Province), des points chauds et leurs éventuelles dérives (voir paragraphe 4-3).

3-4. L'événement de -214 Ma.

En considérant qu'il y a eu un triple impact lors de cet événement, les données de base sont fournies par les calculs de la première section et adaptées à la carte de Scotese :

Position du premier impact, Rochechouard:	7°	32°
Position du deuxième impact, Manicouagan :	-20°	32°
Position du troisième impact, Saint Martin :	-40°	32°
Les intervalles de temps (et distances) sont :		
1,8 h	(soit 2540 km)	entre Rochechouard et Manicouagan,
3,10 h	(soit 6400 km)	entre Rochechouard et Saint Martin,
1,33 h	(soit 1884 km)	entre Manicouagan et Saint Martin.

Les interférences sont calculées en examinant successivement chaque couple d'impact et en les replaçant dans une chronologie commune. L'instant du premier impact est pris comme origine des temps. Trois lieux géométriques (**figure 10**) sortent facilement du processus de calcul automatique. Il est remarquable que les trois courbes soient établies pour une valeur identique de la vitesse des ondes : 6,40 km/s.

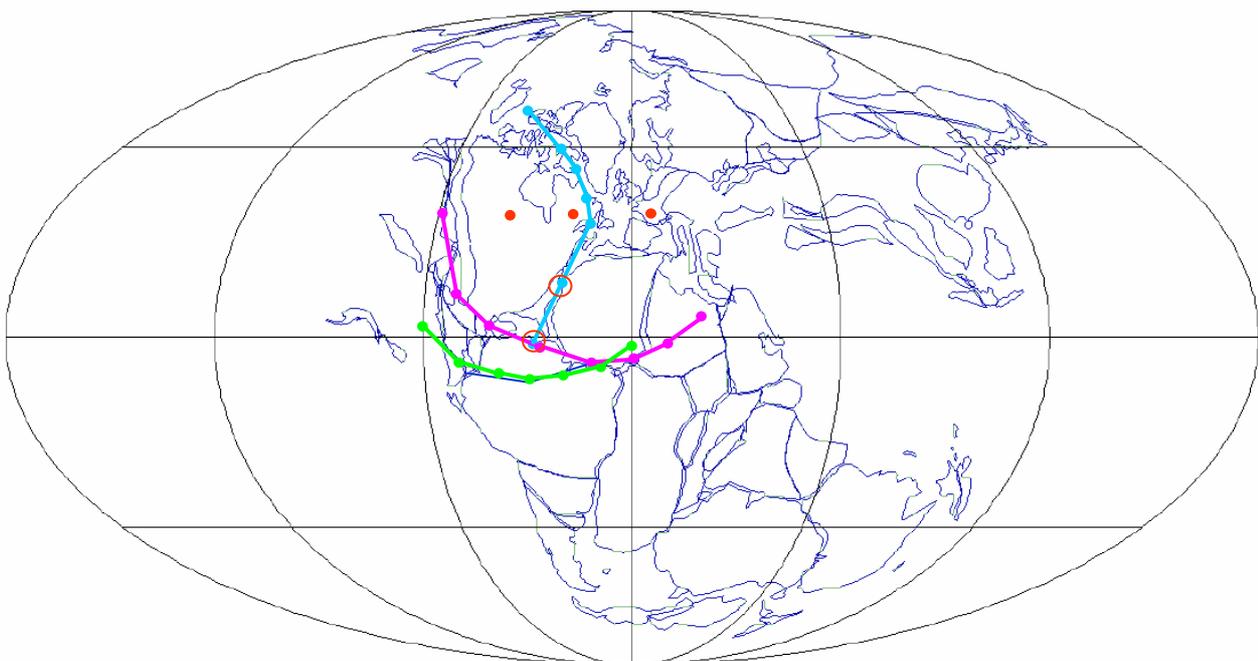


Fig. 10. Triple système d'interférences produit par les impacts (points rouges d'est en ouest) de 1 : Rochechouard, 2 : Manicouagan, 3 : Saint Martin. La courbe bleue correspond au couple 1-2, la courbe pourpre aux impacts 1 et 3 et la courbe verte à la dernière combinaison 2-3. La carte représentée ici est une adaptation de celle de Scotese, en -214 Ma.

Les ondes émises par Rochechouard ont parcouru un tour de terre avant de rencontrer celles provenant de Manicouagan. La courbe bleue (6500 km) traduit cette rencontre et préfigure les futures séparations entre l'Amérique du nord et l'Afrique ainsi qu'entre le Canada et le Groenland.

La courbe pourpre (15500 km) longe la côte pacifique du continent nord américain traverse le Mexique et suit la côte d'Amérique du sud depuis le Venezuela jusqu'au Brésil avant de pénétrer en Afrique. On remarquera aussi qu'en longeant la côte pacifique, la courbe pourpre se trouve en superposition avec la zone de subduction entre les plaques américaine et pacifique. On notera que dans cette dernière partie, entre le Lac Tchad et la mer Rouge, les écarts avec des failles connues aujourd'hui atteignent 1000 km à l'extrémité (voir paragraphe 5-2).

La courbe verte (4400 km) est en bon accord avec la faille transamazonienne et rejoint la courbe pourpre au fond du golfe de Guinée (proche du futur Mont Cameroun). L'accord en position est meilleur que 300 km le long de 23000 km sur les 26300 km correspondant à ces trois courbes.

Plusieurs points chauds (actuels) se trouvent au voisinage de ces courbes qui sont sans doute annonciatrices de fractures ultérieures : Cap Vert, Fernando de Noronha, Ascension, Cameroun. Les trois systèmes d'interférences sont remarquablement proches de l'île Fernando et y conjuguent leurs effets en moins de 2 heures. En particulier, les courbes bleue et pourpre correspondent à des directions perpendiculaires à l'emplacement de l'île, ce qui devrait aggraver les effets. Il y a donc là une situation globale très complexe, tectonique et volcanique, où doivent se trouver les préludes de la grande éruption du CAMP (Central Atlantic Magmatic Province) qui va se produire très rapidement, dans une dizaine de millions d'années seulement après ce triple cataclysme.

Pour compléter cette vision de l'événement, il faut regarder aussi aux antipodes si des structures particulières peuvent émerger. Sur la **figure 11**, sont représentées les deux courbes obtenues pour des vitesses de 6,40 km/s, la même valeur que celle utilisée pour les effets dans l'hémisphère nord. Sur cette carte actuelle on a aussi marqué les zones de subduction (Fidji-Vanuatu-Salomon et Kermadec-Tonga) et les points chauds. On peut se poser la question de savoir où étaient ces zones de subduction en -214 Ma et si elles existaient ? Il est aussi intéressant de noter que la courbe rouge passe au-dessus de 2 points chauds bien connus : les îles Samoa et les îles Hawaii.

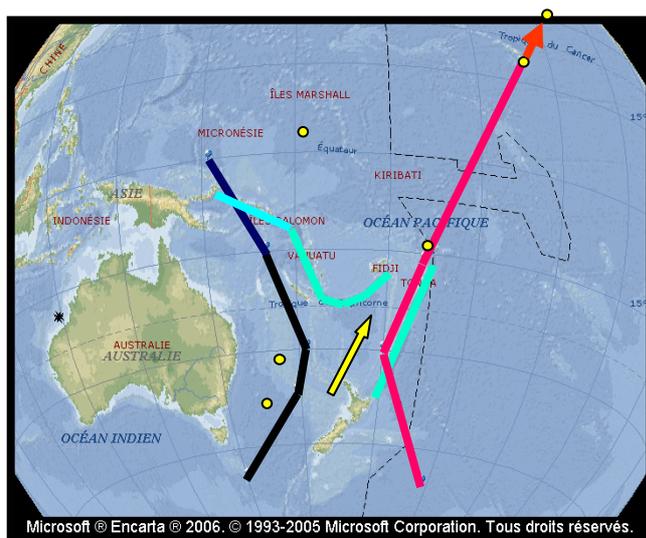


Fig. 11. Interférences aux antipodes en -214 Ma projetées sur une carte actuelle. Y figurent aussi les fosses existantes (en Cyan) et les points chauds (points jaunes) : Tasmanid, Lord Howe, Samoa, Hawaii, Caroline.

La chronologie de l'évènement, en dépit de la complexité des mouvements aller-retour des ondes, est reconstituée dans le **tableau 7** ci-dessous. Les coordonnées indiquées correspondent aux points donnés par les calculs d'interférence en -214 Ma :

Tableau 7

T1 = 0	<u>Impact de Rochechouart</u> Les ondes n°1 font 1 tour plus 223 s
T2= 6480 s	<u>Impact de Manicouagan</u> <i>Aller du 2ème tour des ondes n°1</i>
T2 + 94 s	Première interférence au Labrador (-14°, +34°)
T2 + 527 s	Iles Elisabeth (-45°, +57°, fin au nord)
T2 + 296 s	<u>Iles du Cap Vert</u> (-20°, 15°)
T2 + 656 s	<u>Ile Fernando de Noronha</u> (-32°, -4°, fin au sud) <i>K=0, sud, courbe rouge (antipode)</i>
T2 + 2078 s	début au nord (-155°, +20°), <u>Iles Hawaii</u>
T2 + 2759 s	passage aux <u>Iles Samoa</u> (-174°, -15°),
T2 + 2834 s	début au sud (-167°, -48°)
T2 + 2843 s	fin centrale (-179°, -30°) <i>K=-1, sud, courbe noire (antipode)</i>
T2 + 3223 s	(166°, -34°), Ile Norfolk, début
T2 + 3442 s	(159°, -14°), Iles Salomon
T2 + 3599 s	(152°, -6°), Iles Salomon, fin
T2 + 3655 s	(135°, -57°), fin vers le sud
T3= 11160 s	<u>Impact de Saint Martin</u> <i>Retour du 2ème tour des ondes n°1</i>
T3 + 295 s	début côte pacifique du Mexique
T3 + 487 s	fin au nord, Iles Elisabeth (-40°, +60°)
T3 + 579 s	<u>Ile Fernando de Noronha</u> (-30°, 1°)
T3 + 860 s	fin au sud-est, Cameroun (0°,0°) <i>Retour du 1er tour des ondes n°2</i>
T3 + 645 s	début côte pacifique (-60°, 0°)
T3 + 731 s	<u>Ile Fernando de Noronha</u> (-30°, -9°)
T3 + 860 s	fin au Cameroun (0°,0°)
Les points chauds importants affectés par les interférences sont soulignés dans ce tableau.	

Les îles Hawaii.

Si l'impact d'Acraman est bien responsable de la formation du point chaud d'Hawaii, en -590 Ma, la plume correspondante aura eu tout le temps nécessaire pour devenir active et apparaître à la surface sous l'action du passage de ces interférences. Il est donc possible que se soit produit une éruption majeure à cet endroit, à peu près contemporaine du CAMP. Les traces de cette éruption ont malheureusement disparu par subduction après leur migration sous la péninsule du Kamchatka.

3-5. L'événement de -250 Ma.

Avec 2 impacts extrêmement puissants (Bedout et Wilkes) qui ont pu heurter la Terre en quelques minutes, cet événement apparaît aussi comme très complexe. En les combinant avec le troisième impact (Araguainha, au Brésil), le système d'interférences devient très riche puisqu'il se révèle que plusieurs vitesses d'ondes, très voisines, peuvent rendre compte de plusieurs zones géographiques caractéristiques sur toute la partie australe du continent. Les données initiales pour conduire le calcul sont:

Position du premier impact, Bedout (1):	92°	-42,5 °
Position du deuxième impact, Wilkes (2):	91°	-62 °
Position du troisième impact, Araguainha (3):	-15,5°	-37,5 °
Les intervalles de temps sont :		
Entre 1 et 2 : 0,05 h ;	entre 1 et 3 : 7,17h ;	entre 2 et 3 : 7,13h.

L'intervalle de temps entre les impacts Bedout et Wilkes est extrêmement court (0,05 ± 0,01 h) et les positions géographiques relatives de l'un par rapport à l'autre difficiles à estimer (supérieures à 1°) pour utiliser la carte de Scortese en -250 Ma. Ceci entraîne donc des incertitudes qui peuvent être importantes sur la détermination des lieux d'interférences. Néanmoins, avec les positions choisies, une vitesse de 6,37 km/s conduit à deux lieux géométriques permettant de représenter nettement la future séparation entre l'antarctique et l'ensemble Inde-Australie et de marquer la côte nord de l'Australie. Ce sont les courbes roses sur la **figure 12**. Le phénomène d'interférence débute au nord de l'impact de Wilkes et se poursuit simultanément vers l'est et l'ouest. Il atteint le sud de l'Inde en 500 s environ. Au retour des antipodes, après 5700 s, les ondes donnent de nouvelles interférences au nord-est et au nord-ouest de l'Australie pour se réunir juste au sud de l'impact Bedout quelques 300 s plus tard.

La combinaison Bedout-Araguainha, avec une vitesse d'onde de 6,43 km/s, donne les courbes en jaune. La partie ouest représente le choc entre le quatrième tour de l'onde issue de Bedout et celle qui vient d'être émise par Araguainha. En Amérique du sud, le lieu géométrique coïncide avec la fracture Chili-Argentine et passe notamment par le Rio de La Plata avant de contourner l'Uruguay. Puis il remonte vers le nord, le long des côtes du Brésil, jusqu'au Cameroun qu'il atteint 300 s après le troisième impact. Plus au nord, le lieu se prolonge vers la Tunisie (atteinte après 720 s) mais on notera un net décalage entre la courbe obtenue et la fracture allant du Cameroun à la Tunisie. L'écart le plus grand, au nord, atteint près de 1000 km. La deuxième courbe jaune à l'est est proche de la future séparation entre l'Inde et l'Australie mais la partie nord du sous-continent indien sera perdue lorsqu'il plongera sous les plateaux tibétains après sa dérive vers le nord.

Avec la troisième paire d'impacts, on obtient les courbes bleues pour une vitesse de 6,45 km/s. A l'ouest, la courbe est pratiquement superposée à la courbe jaune obtenue plus haut entre le Brésil et l'Afrique. Les deux effets sismiques ne se sont succédés qu'à quelques minutes d'intervalle, car ils reflètent l'écart de temps entre les 2 premiers impacts. Des zones de fractures au Chili, en Argentine et au Brésil sont également en coïncidence. Au travers de l'Afrique, du Cameroun à la Tunisie, on retrouve le même écart que celui signalé dans le paragraphe précédent (voir aussi paragraphe 5-2). La deuxième courbe bleue, à l'est, marque bien la future séparation entre Inde et Australie.

D'autres vitesses, 6,28 km/s (points verts) et 6,17 km/s (Points jaunes) suggèrent de nouvelles lignes à travers la masse continentale correspondant à des fractures actuelles : du

Sinaï et de la mer Rouge au sud de la Patagonie d'une part ; entre L'Afrique, Madagascar et l'Inde d'autre part. En fait, les vitesses de 6,28 et 6,17 donnent des résultats pratiquement identiques car elles correspondent à une simple permutation des positions des interférences entre les ondes aller et les ondes retour. Pour d'autres vitesses très voisines, on retrouve les autres lignes de fractures présentes en Patagonie (Rio grande do Sul, Bahia Blanca, Golfo San matias).

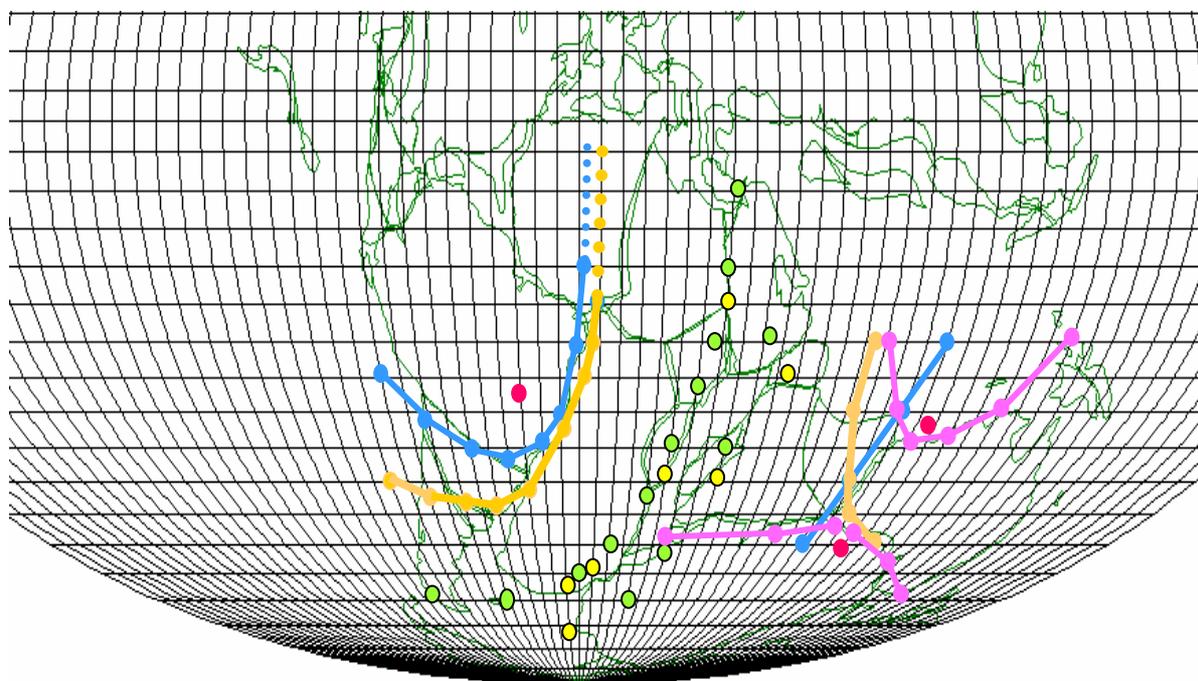


Fig. 12. Systèmes d'interférences en -250 Ma (Carte Scotese). Les points rouges sont les positions d'impacts. Les couleurs des lieux géométriques correspondent aux différentes combinaisons possibles.

L'événement de -250 Ma affecte tout le sud du continent ; l'accord entre les courbes calculées et les positions des failles continentales est de l'ordre de 300 km sur l'ensemble du scénario (quelques 32 000 km), sauf pour la partie nord du continent africain. Comme dans les cas précédents, les écarts sont très compatibles avec les incertitudes inhérentes aux positions initiales et aux reconstructions des continents à cette époque, si l'on ne se fie pas aux coordonnées absolues. Les vitesses d'ondes sont ici encore très voisines et comparables aux vitesses trouvées dans les trois cas précédents.

La région des îles Kerguelen-Heard est particulièrement affectée par 3 systèmes d'ondes qui conjuguent leurs effets à cet endroit. Même constatation pour la région des îles Saint Paul-Amsterdam.

Aux antipodes, le calcul conduit à une ligne d'interférence coïncidant avec la fosse des îles Aléoutiennes, qui est l'image exacte de la courbe rose entourant le continent antarctique.

Une autre remarque importante est suggérée aux antipodes. En effet, il n'y a pas moins de 4 lignes d'interférences qui ont concentré leurs effets en quelques heures dans un cercle de 500 km autour de la position de l'île Jan Mayen (**figure 13a**). Connue comme un point chaud, probablement arrivé à maturité à ce moment là, il est bien situé (**figure 13b**) pour se présenter comme l'une des sources des traps de Sibérie : la fragilisation de la lithosphère en ces lieux peut avoir favorisé l'émergence du magma. Cependant, l'explication ne peut pas être définitive puisqu'il nous manque un impact d'astéroïde (ou une autre cause) qui ait été capable de générer le point chaud de Jan Mayen, sans doute avant -350 Ma.

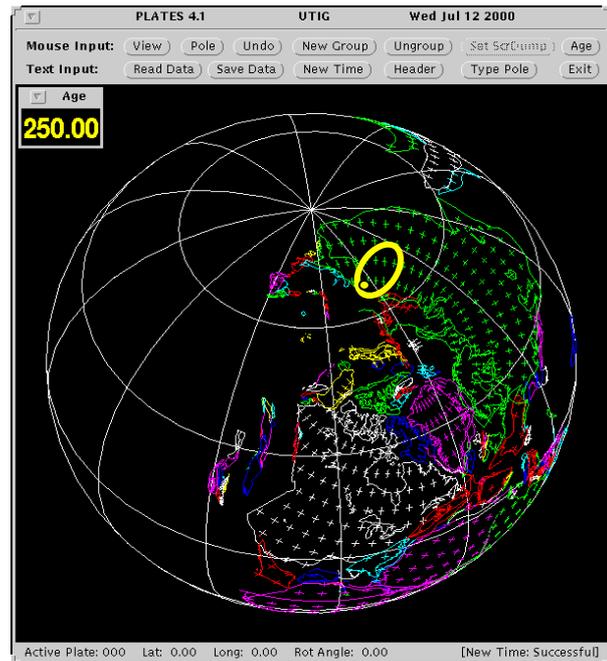
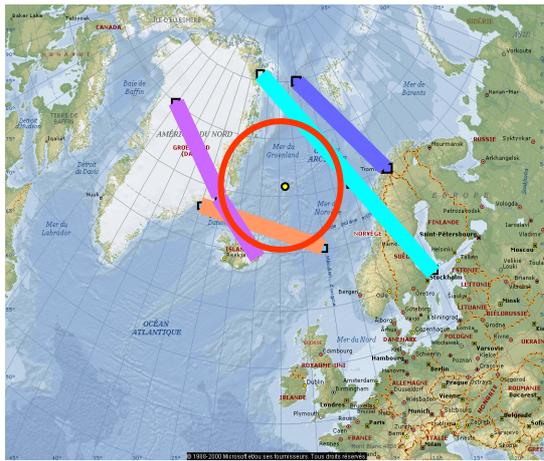


Fig. 13a et 13b. Interférences en -250 Ma autour de l'île Jan Mayen (à gauche) et la position relative des traps de Sibérie (à droite) sur la carte de l'U. of Texas (11).

En moins de 10 heures, l'ensemble des empreintes induites par les effets des trois impacts combinés se trouve ainsi marqué dans la masse continentale, sur plus de 32 000 km de failles (ou plus de 60 000 km de côtes actuelles).

3-6. Dislocation de la Pangée

Les résultats obtenus dans l'étude des quatre événements sont regroupés dans le **tableau 8** et visualisés schématiquement sur la **figure 14**. Un cinquième événement daté en -128 Ma est également inclus dans cette synthèse. Il sera détaillé dans la dernière partie (au paragraphe 5.2) car il apparaît comme une conséquence directe et une prédiction imprévue engendrées par les idées sur le rôle des impacts simples et multiples d'astéroïdes.

Tableau 8

Ma	Impacts	Vitesses d'onde (km/s)	Kilomètres	Couleur
-250	3	6,43 6,37 6,45 6,28 (6,17)	32 000	rouge
-214	3	6,40	26 000	orange
-145	2	6,77	13 000	cyan
-128	2	6,58	6 000	bleue
-90	2	6,20	8 000	verte

Au total, avec seulement 5 événements multiples se produisant à des dates clés de l'histoire de la Terre, il est possible de reconstituer la majorité des côtes océaniques, des failles et fractures que nous connaissons aujourd'hui. Il aura seulement suffi d'une vingtaine d'heures « efficaces » à cinq familles d'astéroïdes pour tracer les quelques 90 000 km du canevas d'où procédera la fragmentation de la Pangée. Ces grands événements suffisent donc pour reconstituer les masses continentales que nous connaissons aujourd'hui.

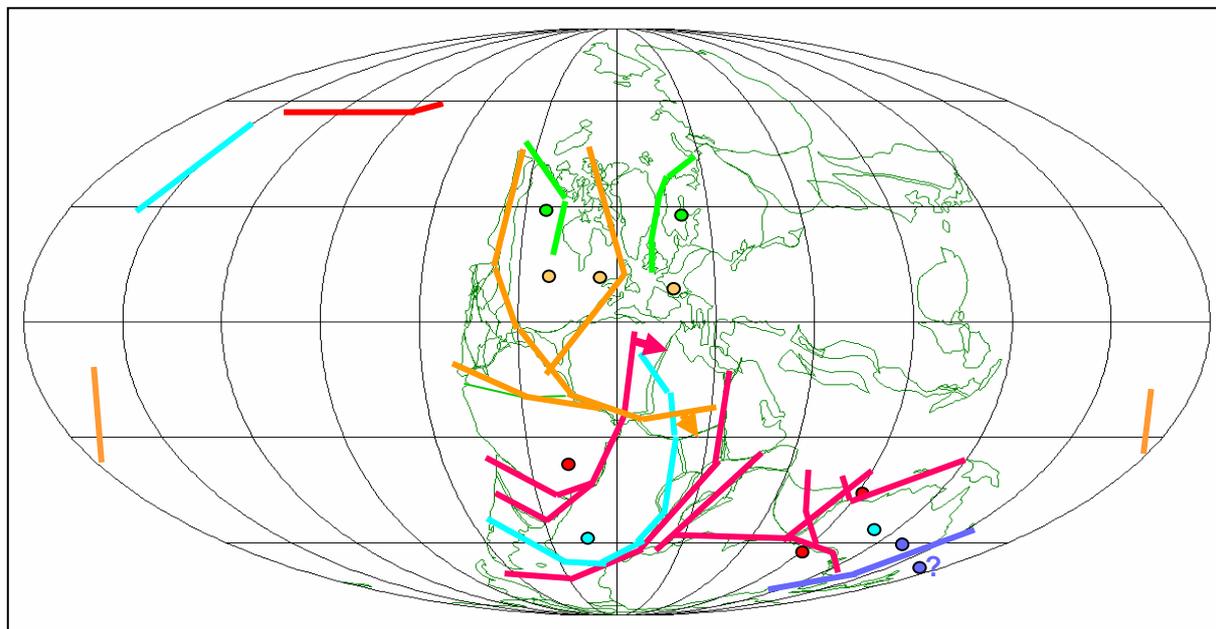


Fig. 14. Fractures dans la Pangée, schématisées et replacées toutes ensemble sur une carte en -250 Ma (carte Scotese).

La fragmentation de la Pangée et du Gondwana se produit en grandes étapes, (14, 15) associées dans plusieurs cas à de grandes éruptions volcaniques (traps) :

- 185 à -175 Séparation de l'Amérique du nord et de l'Afrique (Traps CAMP)
- 160 à -155 Séparation de l'Afrique du bloc Inde, Australie, Antarctique, Madagascar
- 130 à -125 Séparation de l'Amérique du sud de l'Afrique (Traps Parana Etendeka)
- 120 Séparation de l'Australie et de l'Antarctique
- 115 Séparation de l'Inde du bloc Australie-Antarctique (Kerguelen, Broken Ridge, Rajmahal)
- 90 à -85 Séparation de Madagascar et de l'Inde (Traps Madagascar)
- 80 à -50 Ouverture de l'Atlantique nord (Traps NAVP)

On peut conclure que le deuxième test proposé conduit à des résultats qui sont particulièrement intrigants et dont l'ampleur était tout à fait inattendu.

L'ensemble de coïncidences spatiales obtenues entre lieux d'interférences et fragmentations ultérieures incitent donc à voir l'évolution des phénomènes dans le temps. C'est le domaine de la complexité et l'on doit le traiter comme tel, en considérant ces fragmentations comme des systèmes complexes, en évolution dynamique, ouverts et donc en interaction avec leur environnement. Cette perspective conduit naturellement au troisième test proposé. Son objectif est de reconstituer, pour quelques-unes de ces fragmentations, l'enchaînement des relations de causes à effets qui a structuré leur évolution dynamique.

4. L'enchaînement des événements.

Il serait présomptueux et illusoire, dans le simple cadre de ce test de contrôle de la théorie des multi-clics, de vouloir réécrire toute l'histoire de la Terre depuis le Cambrien. Mais on peut analyser quelques cas spécifiques et avoir une idée de l'enchaînement des événements au cours du temps. A partir des deux chapitres précédents, on peut combiner des impacts simples, multiples et leurs conséquences dans l'espace et/ou sur de grandes périodes de temps pour reconstituer des séquences d'événements catastrophiques. Ce concept de multi-clics s'appuie sur les constantes de temps du système Terre qui sont schématiquement :

- de l'ordre de 100 Ma au moins pour qu'un point chaud arrive à maturation et
- de l'ordre de 3 à 10 Ma pour que le magma traverse la lithosphère et déclenche une éruption importante ou que des plaques tectoniques se mettent en mouvements.

Nous appliquons cette démarche à trois cas ayant donné lieu à des éruptions fissurales connues et qui ont fait apparaître l'océan atlantique tel que nous le connaissons.

4-1. Séparation Amérique du nord - Afrique.

Tous les éléments nécessaires ont déjà été rassemblés dans les deux premiers chapitres pour construire un scénario plausible de la genèse du CAMP (Central Atlantic Magmatic Province). Cet événement se situe vers -200 Ma ; il marque la transition entre le Trias et le Jurassique et correspond à l'une des 5 grandes périodes d'extinction massive des espèces.

La Pangée vient à peine de se constituer en continent unifié qu'un premier clic frappe la Terre en -377 Ma ; d'autres arrivent ensuite : ils produisent de nouvelles sources de magmas et façonnent de nouvelles lignes de fractures. Quand les positions respectives des uns et des autres sont adéquates, les éruptions du CAMP se produisent dans les endroits privilégiés et définis au préalable par les impacts plus anciens. La chronologie peut s'établir comme suit :

- 377 Ma L'impact de Sijan affecte la région de l'île Ascension (futur point chaud).
- 345 Ma L'impact de Charlevoix concerne la région de l'île Fernando de Noronha (également futur point chaud).
- 290 Ma Les impacts de Clearwater se trouvent près des îles du Cap Vert (futur point chaud).
- 214 Ma Le triple impact (Rochechouard, Manicouagan, St Martin) trace les grandes lignes de fractures : entre l'Amérique du nord et l'Afrique, entre l'Amérique du sud et l'Afrique, au travers de l'Amérique du sud, au travers du bassin de l'Amazonie. Les effets sismiques passent au voisinage immédiat des positions des trois impacts antérieurs et même conjuguent trois fois leurs actions dans le cas de l'île Fernando. Cet endroit devient particulièrement vulnérable.
- 204 Ma Les points chauds créés précédemment sont arrivés à maturité. Ils finissent par trouver un chemin au travers de la lithosphère grâce aux fractures qui viennent d'être dessinées par le triple impact. Les éruptions du CAMP se développent dans toute la région depuis le Canada jusqu'aux Guyanes et au sud de l'Amazonie, tout autour des fractures créées en -214. Le maximum d'activité est vers -200 Ma.
- 191 Ma Fin des éruptions ; les plaques continentales pourront commencer à dériver, sous la poussée volcanique et avec le mécanisme des dorsales atlantiques. La dérive continue jusqu'à présent.

Sur une carte actuelle sont représentées les distances du cratère de Manicouagan par rapport au Cap Juby (**Figure 15**), sur les derniers 150 Ma, avec un point numéroté tous les 10 Ma. Elles sont calculées avec le programme ODSN. La ligne bleue matérialise l'arc de grand cercle. Les points jaunes, reliés par des segments de droite, sont les positions des îles de l'Atlantique (d'est en ouest : les Canaries, Selvagem, Madère, les Açores). On remarquera la dérive importante de la trajectoire du cratère vers le nord entre -120 Ma et -80 Ma, avant qu'elle ne s'infléchisse résolument vers l'ouest. Cette courbe de dérive se compare bien avec la courbe jaune avec un rapport de similitude de 2,4.

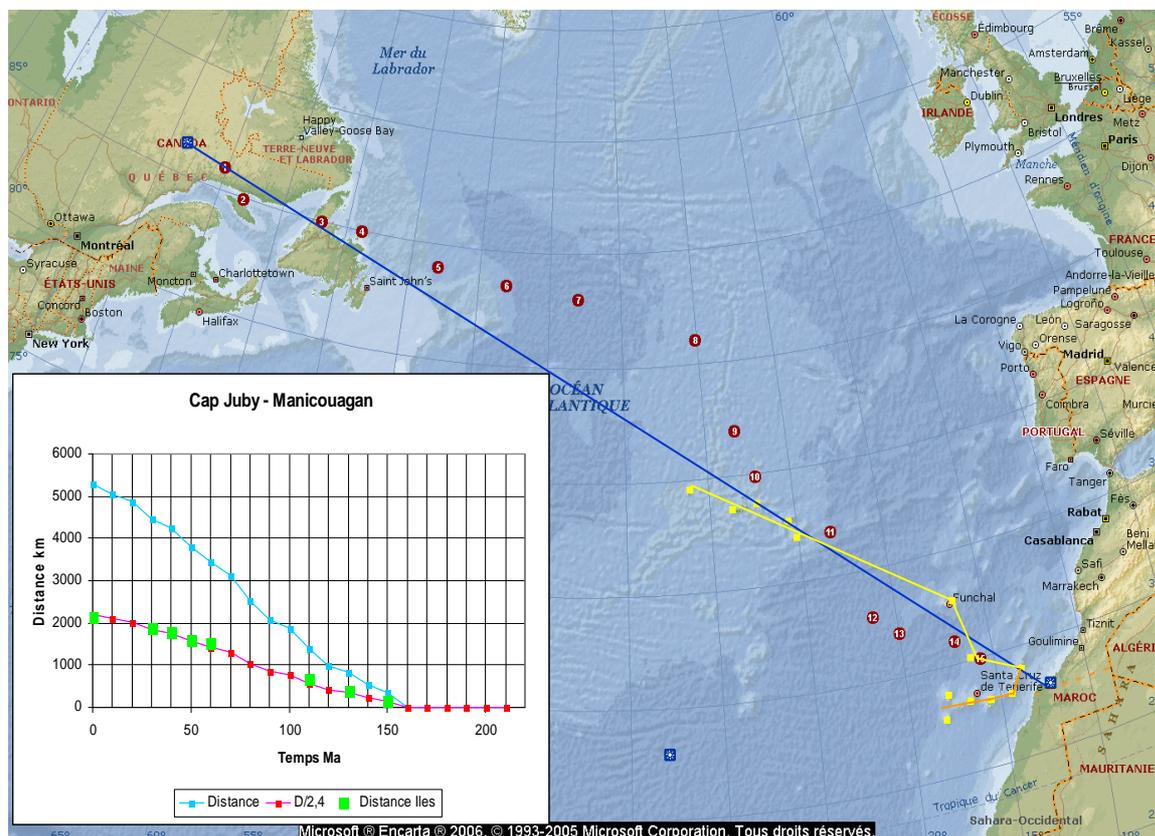


Fig. 15. Distances entre le Cap Juby et le cratère de Manicouagan sur 150 Ma. En bleu, l'arc de grand cercle. Les points chiffrés indiquent les dizaines de Ma. Les points jaunes sont les volcans. Sur le graphique on a représenté les différentes projections sur l'arc de grand cercle.

Le graphique inclus dans la **figure 15**, illustre cette observation. On a projeté sur l'arc de grand cercle les distances du cratère au Cap Juby en fonction du temps pour obtenir la courbe bleue. La courbe rouge est déduite de la précédente en divisant les distances par le facteur annoncé de **2,4** qui est aussi approprié pour retrouver les positions actuelles des îles Florès et Corvo aux Açores. Sur cette courbe figurent également les positions des îles volcaniques (points verts).

Les courbes rouge et jaune pourraient alors s'interpréter comme le lieu des positions successives de la dorsale atlantique et de ses points actifs pendant leur migration depuis Lanzarote jusqu'aux îles occidentales des Açores tout au long des 150 Ma.

4-2. Séparation Amérique du sud - Afrique.

Un scénario semblable au précédent peut rendre compte de cette autre séparation de continents. Elle se produit à la fin du Jurassique ou au début du Crétacé, vers -134 Ma pour le début des éruptions volcaniques de Parana-Etendeka. Il faut cependant remonter à -250 Ma pour retrouver les causes initiales de ce mouvement.

- 250 Ma L'impact d'Araguinha est associé au développement des îles Tristan/Gough (futur point chaud). Le premier triple impact laisse sa double empreinte nord-sud entre l'Afrique et la côte atlantique de l'Amérique du sud
- 214 Ma Le deuxième triple impact détermine le futur tracé équatorial le long des Guyanes et sur la côte nord du Brésil.
- 145 Ma L'impact de Morokweng, à 1500 km du point chaud de Tristan da Cunha, arrivé à maturation, doit « rafraîchir » les lignes précédemment établies, ce qui favorise la montée du magma au travers de la croûte terrestre. D'autant plus que les positions de l'île Tristan et de la faille nord-sud sont en bonne coïncidence à ce moment là.
- 134 Ma Les traps de Parana-Etendeka deviennent effectives et se poursuivent jusqu'en -129 Ma. Les continents se séparent de part et d'autre de la ligne nord-sud. A l'extrémité nord, près des points chauds de Sainte Hélène et du Mont Cameroun, pratiquement superposés à ce moment là, la faille nord-sud croise la ligne équatoriale. Cette dernière devient alors prépondérante en terme de propagation de la fracture et il y aurait trois raisons pour cela :
 - Elle est plus récente ;
 - Elle a pu être récemment activée en glissant le long d'elle-même ;
 - Une rupture de continuité a pu se produire dans la faille nord-sud.Ces deux derniers points sont explicités au paragraphe 5.2.

Dans les 2 systèmes dynamiques qui viennent d'être détaillés, nous avons à traiter des processus relativement simples avec des relations de causes à effets très linéaires. Les interactions mutuelles entre des effets produits par les triple impacts de -250 Ma et de -214 Ma restent très réduites. Ceci peut-être dû au fait que les impacts ont principalement eu des conséquences éloignées, plutôt spécifiques à chacun des 2 hémisphères. C'est donc dans la région intermédiaire (ou équatoriale) que se sont produites les interactions entre les deux systèmes.

Les interactions sont concrétisées par le changement brutal de direction à angle droit du système de fractures au fond du golfe de Guinée puisque la séparation suit d'abord une fracture initiée en -250 Ma avant de s'aiguiller sur une autre datée de -214 Ma.

A ce stade, le fond du golfe de Guinée constitue donc un endroit clé et intrigant avec la présence des points chauds du Mont Cameroun et de Sainte Hélène. Mais leur origine, leur histoire et/ou leur rôle restent ambigus dans ce scénario. Il n'y a pas d'évidence que l'on puisse les relier à un astéroïde connu. Existaient-ils avant cette séparation continentale ? Ont-ils alors été créés lors des processus de fracturations en -250 Ma et/ou en -214 Ma ? Peut-être sont-ils aussi une conséquence des processus de dislocation en -134 Ma ? Ont-ils eu un rôle actif ? Ont-ils évolué séparément depuis ce moment, en suivant respectivement le continent africain et la dorsale sud atlantique ?

4-3. Ouverture de l'atlantique nord.

Le troisième cas constitue un système a priori beaucoup plus complexe qui doit donc être placé dans un environnement plus large, comme le dit Edgar Morin (16):

« Logiquement, le système ne peut être compris qu'en incluant en lui l'environnement, qui lui est à la fois intime et étranger et fait partie de lui-même tout en lui étant extérieur ».

En premier lieu, ce système dynamique est d'accomplissement beaucoup plus récent que les précédents puisqu'il se produit entre -100 Ma et -50 Ma. Ce système est donc en situation de subir des phénomènes dynamiques en cours d'évolution ou n'ayant pas aboutis pleinement, de la part d'évènements antérieurs. Le nombre de paramètres qui peuvent influencer le système et dont il faudrait tenir compte, est important. Ce sont les impacts d'astéroïdes sur les continents européen et américain (Canada, Etats-Unis, Mexique) avec les interférences produites par l'évènement de -90 Ma. C'est aussi la dérive bien avancée du continent nord américain par rapport à l'Afrique avec sa dorsale en plein fonctionnement. Ce sont enfin les points chauds ou les régions volcaniques tels que la NAVP (North Atlantique Volcanic Province), Eifel, l'Islande, Jan Mayen, sans oublier les îles de l'Atlantique (Shetland, Orcades, Féroé, Lofoten), ou Théra au sud. On ne doit pas non plus exclure des possibilités de dérives de points chauds comme évoquées ci-dessus entre les Canaries et les Açores.

La méthode d'approche du problème est donc, dans un premier temps de s'appuyer sur une chronologie de l'ouverture telle que nous l'offre la tectonique des plaques, puisque c'est une observation qui peut se faire indépendamment des causes. Un inventaire critique des éléments du système doit ensuite être conduit. Sur la chronologie il faudra replacer les causes et les conséquences en remontant le plus possible dans le temps, jusqu'aux évènements de -214 et -250 Ma, au moins. Il sera enfin nécessaire d'élargir l'environnement du système et d'imaginer quelques mécanismes spécifiques pour obtenir l'effet final.

Afin de retrouver le déroulement de l'ouverture, 6 points ont été sélectionnés de part et d'autre de la dorsale actuelle. Au sud, la base constituée de Manicouagan et du Cap Juby a été traitée plus haut. Plus au nord, le sud de l'Irlande et le sud du Labrador semblent des points incontournables. Enfin, 8 points sur les côtes du Groenland et de la Norvège ont été choisis (**figure 16**). Leurs coordonnées figurent dans le cartouche de la **figure 17**. Il n'y a plus qu'à calculer les coordonnées de ces points jusqu'à -150 Ma avec le programme ODSN. De là on obtient aisément les distances entre les six couples de points.

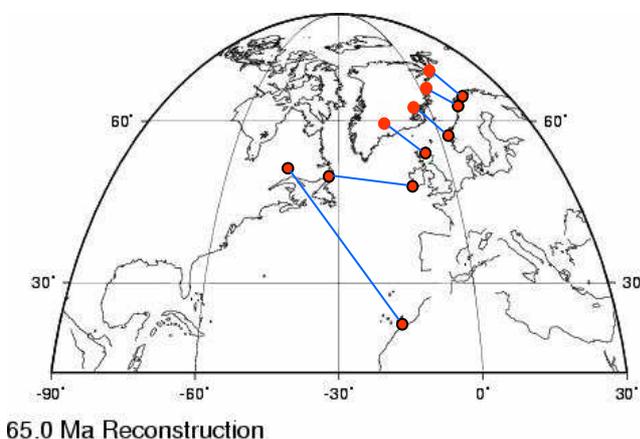


Fig. 16. Ouverture de l'Atlantique nord. Localisation des 12 points de référence.

Le calcul effectué n'est sans doute pas optimal au point de vue précision car on note des décalages entre les positions calculées et la représentation graphique, mais il permet néanmoins de se faire une idée sur l'évolution du phénomène. Globalement, plus on monte vers les latitudes élevées, plus la séparation est tardive. Au niveau de l'Écosse, on peut estimer que le phénomène commence vers -90 MA ou -100 Ma, tandis qu'au nord de la Norvège, ce serait plutôt vers -60 Ma d'après les courbes de la **figure 17**. Plus au sud, dans la partie atlantique, entre Irlande et Labrador (courbe rose), les effets semblent être présents dès -120 Ma. La dérive atlantique en cours, plus au sud, est indiquée par la courbe rouge qui donne cette fois la distance réelle entre Cap Juby et Manicouagan.

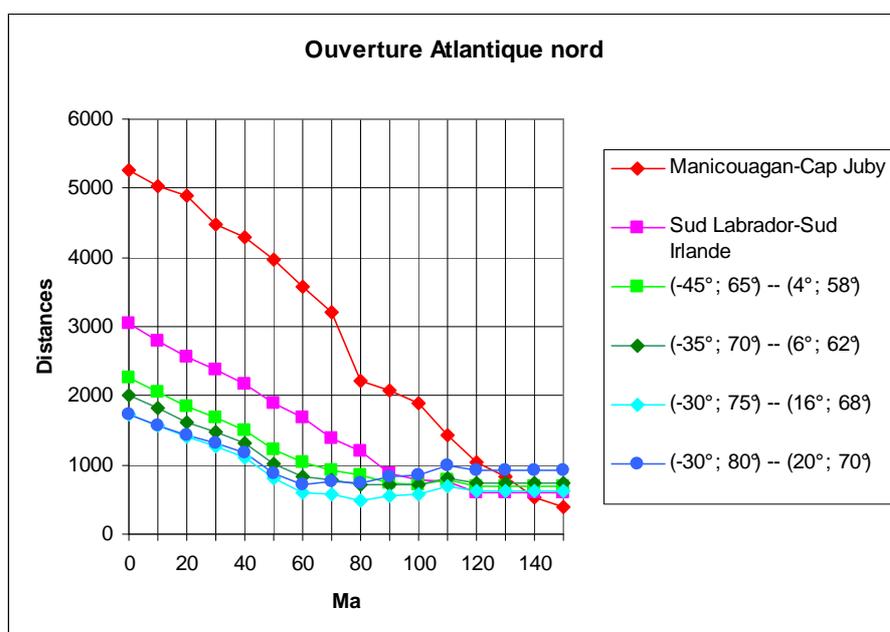


Fig. 17. Distances entre les 6 couples de points de l'Atlantique nord en fonction du temps.

En passant en revue toutes les données qui peuvent intervenir dans le processus, plusieurs difficultés apparaissent ; elles empêchent de construire le type de modèle linéaire qui suffisait pratiquement dans les deux cas précédents. Les points de difficultés sont :

- Il n'y a pas de fait marquant initial évident donnant l'impression d'avoir significativement déterminé l'origine du phénomène.
- Les impacts anciens d'astéroïdes dans cette région ne semblent pas s'accorder avec les explications simples précédemment énoncées : l'impact d'Obolon peut certes être associé au volcanisme de Théra et l'on imagine bien une relation de position entre Mjолnir et la NAVP, cependant les points chauds actifs voisins sont fort éloignés (Eifel) ou en outre sous la masse continentale du Groenland (Islande, Jan Mayen). Mais pourquoi le troisième impact (Puchezkh Katunki, -167 Ma), malgré son diamètre de 80 km, serait-il le seul parmi les grands cratères anciens (tableau 3) à ne pas avoir eu d'effets notables ?
- Le fait que le canal calédonien soit encore visible aujourd'hui au milieu de l'Écosse indique évidemment que les interférences de -90 Ma n'ont pas eu à cet endroit l'effet attendu.

La situation d'incohérence entre les systèmes précédents et le cas présent suggère que, si l'approche est correcte, on se trouve devant des effets nouveaux ou qui n'ont pas encore totalement abouti. Cela implique de complexifier le système en élargissant son environnement

pour retrouver les interactions manquantes. Jusqu'à présent on a privilégié l'environnement spatial, les impacts et leurs conséquences. L'environnement vers l'intérieur de la terre s'est limité à des relations achevées entre impacts, points chauds et lignes de fractures. Mais on est peut-être dans une situation où ces effets dits spatiaux, essentiellement statiques, sont en compétition avec des événements dynamiques venant de l'environnement interne tels que plumes, points chauds avortés ou non terminés et dorsales atlantiques.

Les tomographies donnant les anomalies de températures à 500 km et 2850 km (17) et leurs relations avec les points chauds (8), (figure 18) révèlent des zones d'intérêt qui peuvent être mises en relation avec le système étudié. Comme on pouvait le prévoir, une zone intense court le long de la dorsale, englobant les points chauds d'Islande et de Jan Mayen. On note aussi une zone moins intense constituée de deux lobes reliés entre eux, l'un sous l'Europe orientale et l'autre sous la Scandinavie. Un pont thermique semble aussi relier la zone scandinave à la zone islandaise.

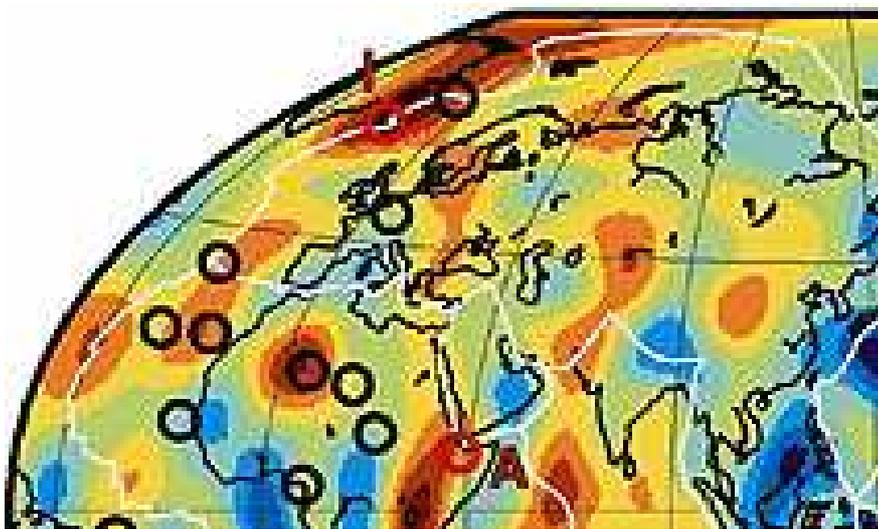


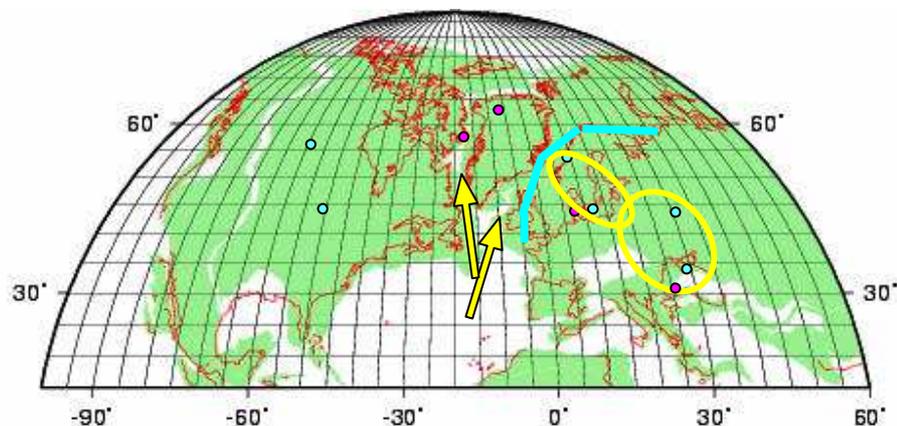
Fig. 18. Tomographies à 500 km avec les positions des points chauds.

Il s'agit là d'une description actuelle du manteau supérieur. Quelle pouvait être cette situation thermique au moment des impacts de -90 Ma ou vers -60 Ma lors des éruptions NAVP ? En particulier, la zone islandaise préexistait-elle à la formation de la dorsale ? Ou y a-t-il eu migration et redistribution thermique entraînant l'ouverture de l'Atlantique nord ? Dans un premier temps, le mieux semble de se préoccuper des lobes continentaux, d'admettre que leur existence est ancienne, que leurs grandes dimensions peuvent assurer une certaine pérennité sur les périodes qui nous concernent. Sur la **figure 19a**, carte ODSN de -90 Ma, sont portés les différents éléments susceptibles d'apporter leur contribution au système étudié :

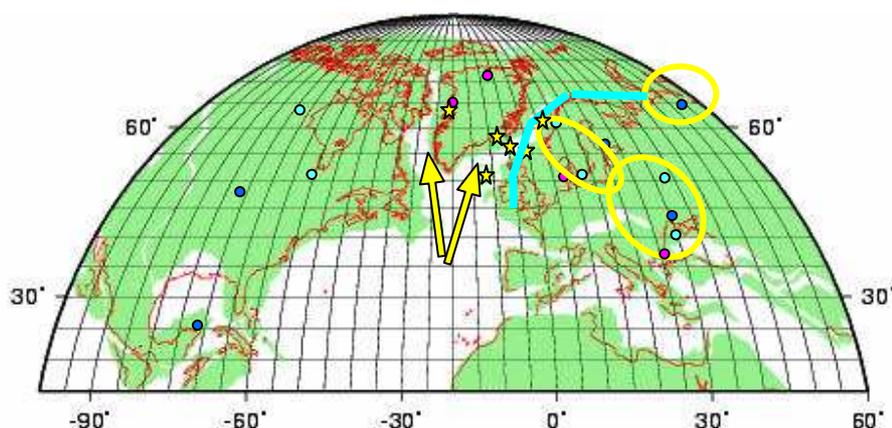
- les points volcaniques connus aujourd'hui, en rouge : Islande, Jan Mayen, Eifel, Théra ;
- les positions originelles des impacts antérieurs à -90 Ma, points couleur cyan : De gauche à droite, Steen River, Carswell, Mjolnir, Dellen, Obolon, Puchezkh Katunki, avec les interférences en -90 Ma (lignes couleur cyan) ;
- les zones d'anomalies de température à 500 km de profondeur, en jaune ;
- la position estimée de la dorsale atlantique en -90 Ma, d'après le paragraphe 4-1 (flèches jaunes) qui s'étend en deux branches, à l'ouest et à l'est du Groenland.

Sur la **figure 19b**, carte ODSN de -60 Ma, ont été rajoutées les données apparues entre -90 Ma et -55 Ma :

- les positions d'impacts postérieurs à -90 Ma (points bleus) : de gauche à droite, Chicxulub, Manson, Lappajarvi, Boltysch et Kara ; on remarquera qu'à l'impact de Kara se trouve également un lobe thermique à 500 km.
- Les éruptions volcaniques (ouest Groenland, côte est du Groenland, Féroé, Shetland, Rosemary Bank /Rockall, Voring basin).



90.0 Ma Reconstruction



60.0 Ma Reconstruction

Fig. 19 a et 19 b. Ouverture de l'atlantique nord. Cartes ODSN en -90 Ma et -60 Ma.

Scénario possible :

- 250 Si Jan Mayen est responsable des traps de Sibérie, le point chaud correspondant demeure actif.
- 214 Le triple impact crée l'interférence entre Labrador et Groenland.
- 190 L'Amérique du nord commence à se séparer de l'Afrique.
- 167 les impacts de Obolon et Puchezkh Katunki initient la création du lobe thermique sous l'Europe de l'est et les futures éruptions de Théra au sud du lobe.
- 142 Mjlnir initie la naissance du lobe nord qui interfère avec le lobe sud pour donner un grand complexe européen, de la Scandinavie à la Grèce.
- 120 La dorsale atlantique se situe entre Madère et les Açores. Elle commence à se prolonger vers le nord puisque la distance entre l'Irlande du sud et le sud du Labrador commence à croître. Ce fait est en accord avec la dérive de la trajectoire du cratère de Manicouagan visible sur la **Figure 15**, paragraphe 4-1.

- 100 L'ouverture de la mer du Labrador prend de l'ampleur en suivant la ligne de rupture tracée par le triple impact de -214 Ma.
- 90 Le double impact crée la ligne d'interférence décrite précédemment. L'impact de Dellen conforte le lobe nord et facilitera la montée du point chaud d'Eifel. La progression de la dorsale atlantique vers le nord se poursuit, la distance Ecosse-Groenland commençant à croître. L'ouverture de la mer du Labrador se poursuit toujours. C'est un moment clé de l'évolution des systèmes puisque les 4 événements dynamiques sont concomitants et concurrents dans un espace restreint. Le phénomène le plus « faible » peut être celui des interférences de -90 Ma puisqu'elles ont été produites par des impacts externes très modestes, face à des phénomènes internes plus énergétiques. Ce serait la raison qui aurait permis au canal calédonien de subsister et à l'ensemble Nord Ecosse/ Irlande de ne pas se séparer du reste des îles Britanniques.
- 70 Il semble donc que la branche est de la dorsale l'emporte avec la fin proche de l'ouverture de la mer du Labrador et avec les premières éruptions dans l'atlantique nord : Rockall/Rosemary bank. Elles vont être suivies rapidement par celles d'Antrim et d'Ecosse. Une activité du lobe scandinave pourrait être à l'origine de ces éruptions (18), plutôt que les points chauds d'Islande et de Jan Mayen qui semblent bien loin pour être responsables de ces éruptions. D'autant plus que des éruptions sur la côte ouest du Groenland cadrent bien avec la position de l'Islande.

A partir de l'Ecosse, l'éruption fissurale s'étend dans 2 directions :

- vers le nord en suivant graduellement la fracture dessinée par les impacts de -90 Ma (Shetland, éruptions en -63 Ma, Voring Basin éruptions en -58 Ma et ouverture de l'extrême nord vers -55 Ma ;
- vers l'ouest, sur une très petite distance la séparation entre la Norvège et le Groenland commence avec les éruptions aux Féroé et au Groenland (- 62 Ma) puis vers le nord.

Plus tard, avec la dérive du Groenland, les points chauds d'Islande et de Jan Mayen se retrouvent sur la côte est, rejoignent le complexe scandinave et l'emportent finalement en se calant sur la dorsale atlantique.

Le scénario met en scène de nombreuses composantes spatiales et internes et leurs liaisons dynamiques. Il permet de rendre compte de la formation d'un certain nombre d'éléments de la structure actuelle de l'Atlantique nord. Cependant on peut, et sûrement même on doit, envisager un élargissement très probable du système. Par exemple, on peut se poser la question de savoir si les impacts d'astéroïdes de -70 et -65 Ma n'ont pas joué un rôle à distance dans ce processus. Sans oublier les causes de l'apparition du Gulf Stream...

5. Conclusions.

Les hypothèses simples et les tests de validation ont conduit à des conséquences intéressantes sur le rôle possible des impacts d'astéroïdes sur l'émergence de points chauds ou la formation de masses continentales. Nous avons essayé d'expliquer les causalités de phénomènes apparus à la surface de la Terre sur de grandes durées ou de grands espaces, en faisant intervenir un environnement large, depuis la ceinture d'astéroïdes jusqu'à la limite inférieure du Manteau. Après un bilan rapide (5-1) nous préciserons, à titre d'exemple, trois phénomènes très différents qui ont pu se produire dans le passé; ils sont des conséquences directes de cette approche et constituent des « prédictions » vérifiables par des observations de terrain.

5-1. Perspectives.

Les familles d'astéroïdes

La notion de familles d'astéroïdes tombant sur Terre constitue une hypothèse très intéressante et particulièrement décisive pour expliquer le processus de fragmentation de la Pangée. Le plus surprenant réside dans le nombre élevé de familles qui peuvent être constituées et qui donnent effectivement des résultats interférométriques. Les 15 astéroïdes tombés entre -250 Ma et -90 Ma peuvent en fait être réduits à 5 ou 6 familles seulement : -250 Ma, -214 Ma, -145 Ma, -128 Ma et -90 Ma. D'après les impacts observés sur Terre, les dimensions caractéristiques de ces familles seraient de l'ordre de quelques milliers de km perpendiculairement à la trajectoire de la famille et de quelques centaines de milliers de km le long de cette même trajectoire.

On pourrait aussi ajouter à ces familles,

1. l'ensemble fait d'Obolon et de Puchezkh Katunki est tombé vers -167 Ma. Mais cette combinaison d'impacts n'a pas donné de résultats d'interférences remarquables. Il est en effet possible que ces 2 astéroïdes aient bien constitué une famille mais que leur distance mutuelle, donc l'intervalle de temps entre impacts, soit trop grande pour que les ondes de chacun d'eux existent simultanément.
2. l'ensemble des deux cratères de Boltysh (24 km, $-65,17 \pm 0,64$ Ma) et de Chicxulub (170 km, $-64,98 \pm 0,05$ Ma). Cependant aucune interférence n'est tirée de cet ensemble.
3. l'ensemble des trois cratères de Manson (35 km, $-73,8 \pm 0,3$ Ma), de Lappajarvi (25 km, $-73,3 \pm 5,3$ Ma) et de Kara (65 km, $-70,3 \pm 2,2$ Ma).
4. L'ensemble des trois cratères de Mistastin (28 km, $-36,4 \pm 4$ Ma), de Popigai (100 km, $-35,7 \pm 0,2$ Ma) et de Chesapeake bay (90 km, $-35,5 \pm 0,3$ Ma).

Un regroupement des impacts en un nombre restreint de familles conduit à une pseudo période d'occurrence des impacts de l'ordre de 30 Ma.

Si la règle des impacts multiples continue de s'appliquer vers les temps plus reculés, on peut se poser la questions de savoir si les impacts antérieurs n'ont pas aussi été multiples, en particulier ceux qui sont contemporains de grands évènements ou d'extinctions massives :

Clearwater, à la fin du Carbonifère,	Charlevoix, milieu du Carbonifère,
Woodleigh, fin du Dévonien,	Sijan, Frasnien-Famennien,
Slate Island, fin de l'Ordovicien,	etc

Comme dans le cas de -128 Ma (voir paragraphe suivant), on a essayé de rechercher si, à ces impacts connus, on pouvait associer d'autres impacts inconnus, qui créeraient des

interférences caractéristiques de continents qui auraient précédé la Pangée. Le résultat s'est avéré négatif, à cause des incertitudes multiples (sur les datations, sur les positions reconstituées, sur les formes et les délimitations des continents). Il sera à revoir lorsque des données plus précises et plus fiables seront disponibles.

Un dernier aspect prospectif concerne la mécanique céleste et les mouvements dans le système solaire. En effet, parmi les différentes familles qui ont percuté la Terre à des dates connues, il est possible que certains éléments des familles soient passés au voisinage de la Terre sans la toucher. Les familles amputées des éléments perdus sur Terre doivent continuer de tourner dans le système solaire. Il n'y a sans doute pas d'espoir de retrouver leurs mouvements et de les localiser, mais peut-être sont-ils déjà répertoriés parmi les astéroïdes « géocroiseurs ».

Phénomènes d'interférences

Comme conséquence de la notion de familles d'astéroïdes, l'idée de phénomènes d'interférences à l'échelle planétaire s'impose de façon simple et naturelle. Ce qui est particulièrement déroutant, c'est la simplicité des hypothèses et des calculs, comparée à l'étendue des conséquences. Les positions et les datations des impacts ou les intervalles de temps entre eux sont des données dont la précision est acceptable, même avec les difficultés de reconstructions temporelles. Il n'y a qu'une seule variable d'ajustement, la vitesse des ondes. De plus, il est remarquable que les vitesses soient toutes comprises entre 6,2 et 6,7 km/s avec une valeur privilégiée vers 6,4 km/s et qu'en cinq occasions, des causes similaires produisent des effets similaires.

Dans le processus de traitement des évènements, tel qu'il a été mené, on s'est contenté de passer directement des causes aux effets en suivant un raisonnement phénoménologique et globalisateur. Les étapes intermédiaires impliquant le « comment » de leur réalisation n'ont pas été approfondies. Si ces étapes n'étaient pas nécessaires dans un premier temps pour la présente démonstration, elles deviennent maintenant indispensables pour quantifier les grandeurs et les phénomènes. Elles concernent notamment les questions suivantes :

- le transfert d'énergie entre l'impact et les ondes sismiques,
- la répartition des ondes, en surface et en volume,
- la propagation des ondes,
- les effets locaux ou globaux d'atténuation ou de pertes d'énergie,
- la physique des collisions d'ondes le long des lignes d'interférences, suivant les intensités et les directions,
- les effets répétés au même lieu dans des temps très courts (Ile Fernando),
- les réflexions aux antipodes,
- etc

Points chauds

La relation entre les points chauds et les impacts d'astéroïdes ne semble pas due au hasard. Une application directe concerne la tectonique des plaques pour reconstituer des configurations anciennes. On peut en effet établir des positions cible intermédiaires pour remonter dans le temps, comme cela a été esquissé avec les cratères de Clearwater, Charlevoix et Sijan.

Un grand nombre de points chauds peuvent être associés directement, en position, aux figures d'interférences obtenues (Cap vert, Açores, Canaries, Great Meteor, Cameroun, Ste Hélène, Tristan, Ascension, Hoggar, Tibesti, Darfour, Samoa, Hawaii, Erebus, Bouvet, Eifel, etc.). D'autres n'ont pas été retrouvés dans le processus (Réunion, Louisville, île de Pâques,

Jan Mayen, Islande, etc). Dans ces derniers cas, soit les astéroïdes n'ont pas été identifiés (ou sont perdus par subduction), soit d'autres causes doivent être invoquées.

Tomographie thermique

Lors de l'étude de l'ouverture de l'atlantique, il a été nécessaire de faire appel aux tomographies donnant les anomalies thermiques à 500 km et 2850 km. Outre les lobes d'Europe de l'est et de Scandinavie que l'on peut associer aux positions d'impacts de plusieurs astéroïdes, sur la **figure 18** se produisent aussi d'autres coïncidences :

- Le lobe près de la mer de Kara est en accord de position avec l'impact de Kara en Russie (65 km et -70,3 Ma) ;
- Plus au sud, le lobe d'Asie centrale coïncide avec une position d'impact très récent, celui de Kara-Kul, au Tadjikistan (52 km, inférieur à 5 Ma) ;
- Le lac Qinghai avec sa petite île centrale de Haixin Shan se superpose au lobe chinois, suggérant ainsi une origine météoritique vieille de 30 à 60 Ma (estimation en tenant compte des positions compatibles de l'impact et des mouvements des continents) .
- D'autres points notables peuvent être trouvés : impacts de Chicxulub, de Rochechouard, en rapport avec des « anomalies » thermiques.

Tomographies, points chauds et impacts d'astéroïdes méritent un traitement simultané car un certain nombre de coïncidences ne semblent pas dues au hasard.

Tectonique des plaques

Les plaques tectoniques qui sont utilisées lors des différentes reconstitutions sont fondées sur celles que nous connaissons aujourd'hui. Qu'en était-il avant la formation de la Pangée ? Comment ces anciennes plaques ont-elles résisté à la formation de cette Pangée ?

Ce qui se produit au niveau des zones de subduction reste très énigmatique. En plusieurs occasions les lieux géométriques obtenus semblent coïncider avec des fosses océaniques. S'il est admis que les zones de subduction existaient avant que la Pangée ne se forme, leur comportement pendant sa dislocation, leur formation, leur évolution ou leur pérennité restent à approfondir.

La difficulté majeure qui est apparue dans ce travail résidait dans les inter-comparaisons entre les différentes reconstructions proposées par de nombreux auteurs. Il serait utile de disposer de cartes à des dates clés (-150, -250, -350 Ma par exemple), qui fassent l'objet d'un consensus, comme cela a été fait pour la carte stratigraphique internationale.

Extinctions massives

Trois événements sont contemporains d'extinctions massives (-250, -210, -145 Ma). Ceux de -128 et -90 Ma ne sont contemporains que de phénomènes d'extinction mineurs. Sans aborder la discussion sur les causes des extinctions, les résultats obtenus ici suggèrent néanmoins une piste pour ceux qui voudraient approfondir le rôle des astéroïdes en -250 Ma. Si les impacts de Bedout et de Wilkes sont difficiles à caractériser, il n'en est pas de même pour le troisième impact, Araguainha. Une datation plus précise de ce cratère par rapport aux dates d'extinction, pourrait donner des arguments nouveaux, positifs ou négatifs sur les causes d'extinctions massives notamment à cette date.

5-2. Trois cas spécifiques

Les trois cas qui suivent sont des exemples très différents de prévisions que l'on peut faire à partir des hypothèses et des développements qui ont été exposés tout au long de ce texte :

- 1- Un déplacement global (translation + rotation) de la partie nord de l'Afrique vers 200 Ma, peut expliquer les différences de 1000 km trouvée en -250 et -214 Ma,
- 2- Une application à Mars (Valles Marineris) montre que les explications avancées pour la Terre peuvent aussi se transposer à d'autres planètes ou satellites,
- 3- La prévision d'un événement qui se serait passé en -128 Ma offre une possibilité de vérification globale des hypothèses faites.

Le Nord de l'Afrique

En deux occasions nous avons vu que les lignes d'interférences qui traversaient le nord de l'Afrique n'étaient pas en coïncidence avec les lignes de fractures que nous connaissons aujourd'hui lorsqu'elles sont replacées dans leurs positions de l'époque. Il s'agit d'une part de l'événement de -250 Ma où la double ligne transsaharienne s'écarte de la fracture Cameroun-Tunisie, plus on remonte vers le nord. L'écart extrême est de l'ordre de 1000 km. D'autre part, l'événement de -214 Ma donne un effet semblable : la ligne équatoriale s'écarte de la fracture Cameroun-Mer Rouge plus on progresse vers l'est. L'écart extrême est aussi de l'ordre de 1000 km.

L'événement postérieur, en -145 Ma, parcourt l'Afrique, du sud au nord et garde, une complète continuité entre les grands lacs africains et le Darfour, traversant ainsi les lignes équatoriales et nord-sud précédentes sans altération.

Un autre fait insolite s'est produit lors de la séparation Amérique du sud-Afrique, vers -134 Ma : il s'agit du changement de direction de la fracture au fond du golfe de Guinée : après avoir suivi la ligne marquée en -250 Ma, la fracture s'est poursuivie le long de celle qui a été générée en -214 Ma (Paragraphe 4-2).

Ceci laisse donc penser qu'un événement tectonique global aurait pu affecter toute la partie nord de l'Afrique entre -214 Ma et -145 Ma. Ce mouvement paraît avoir 2 composantes : une translation est-ouest de quelques centaines de km et une rotation vers l'est de 10 à 15° (d'après les **figures 12 et 14**). Le centre de rotation pourrait se trouver aux environs du Mont Cameroun. Il semble qu'il faille chercher la cause de ce phénomène dans le système responsable de la Séparation Amérique du nord-Afrique, vue en 4-1.

Les éruptions du CAMP et la formation de la dorsale atlantique en séparant les deux continents ont pu exercer une forte pression sur la partie nord de l'Afrique qui aurait alors glissé vers l'est, guidée par la faille équatoriale qui venait tout juste d'être créée par le triple impact de -214 Ma. L'explication de la rotation n'est peut-être pas simple, à moins qu'il ne s'agisse d'un mouvement impliquant tout le Gondwana. D'autres questions se posent encore : si l'on peut estimer la date, la durée reste incertaine (10 Ma pour un déplacement de quelques centaines de km ?) ; l'excédent continental africain a-t-il disparu sous la mer Rouge ?

L'effet d'un mouvement global de la partie nord de l'Afrique apparaît comme une conséquence nécessaire des hypothèses faites sur les impacts d'astéroïdes et les lieux

d'interférences. Il correspond en effet à un maillon manquant dans une histoire à enchaînements spatiaux et temporels complexes. On peut simplement résumer son importance par :

« Vers -180 Ma, un mouvement tectonique global du nord de l'Afrique, causé par des effets secondaires de l'événement de -214 Ma, a entraîné des discontinuités dans les lignes de fractures établies en -250 et en -214 Ma. Vers -134 Ma, ces discontinuités ont perturbé le développement des conséquences de l'événement de -250 Ma. Il a imposé de prendre en compte les conséquences de l'événement de -214 Ma ».

Mars : Valles Marineris.

On peut raisonnablement se poser la question de savoir si le raisonnement associé aux multi-clics peut avoir des prolongements vers d'autres corps du système solaire, Mars par exemple avec ses fameux « canaux » et surtout la structure extraordinaire de Valles Marineris. Longue de plus de 4000 km et parfaitement rectiligne, elle fait penser aux grands lieux géométriques mis en évidence précédemment à la surface de la Terre.

Le problème est considérablement simplifié sur Mars grâce à l'absence de tectonique de plaques. Les positions respectives des cratères d'impact et de leurs effets ont donc conservé la même géométrie depuis la date de l'évènement.

Le centre de Valles Marineris est le plus tourmenté avec un système complexe de lignes parallèles. Il peut être considéré comme le point de départ du système d'interférences causé par deux impacts quasi simultanés. Les deux cratères correspondant peuvent être localisés près de l'arc de grand cercle perpendiculaire à la faille passant par son centre (schématisé en traits bleus sur la **figure 20**). A peu près symétriques par rapport à la faille, se trouvent deux cratères qui semblent être des candidats intéressants. Au sud dans une région d'altitude élevée, un cratère bien formé se trouve aux coordonnées -81° et $-51,7^{\circ}$. Du côté nord, le site est de basse altitude et très affecté par des alluvions. Le cratère original peut donc être partiellement enfoui comme ce pourrait être le cas pour le candidat potentiel situé aux coordonnées $-59,5^{\circ}$ et $+27^{\circ}$.

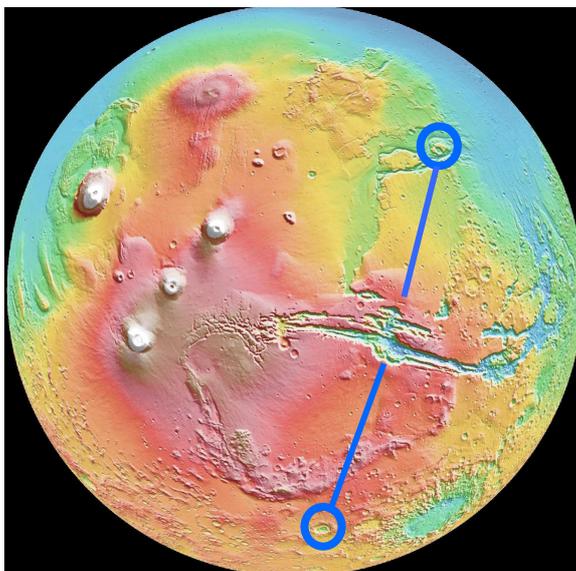


Figure 20. La planète Mars et «Valles Marineris». Les sommets sont en blanc. Les régions d'altitude élevée sont en rouge. Celles qui sont au plus bas figurent en bleu. Les segments en bleu schématisent l'arc de grand cercle perpendiculaire à la faille en son centre. Les cercles désignent les positions des cratères envisagés. Carte NASA-Mars-MOLA.

Le programme de calcul des interférences terrestres, adapté aux paramètres martiens, est ensuite utilisé. Comme on s'y attendait, le lieu géométrique obtenu rend compte des 4000 km de la faille (**Figure 21**). Cinq points de calcul, indiqués par les étoiles jaunes, matérialisent les résultats et permettent de tracer la droite moyenne en jaune. L'incertitude sur ces points est de l'ordre de 120 km, ce qui reste inférieur à la largeur de la faille.

Plus tard, les sillons initiaux ont été dégagés de leurs débris et élargis par les fleuves. Les alluvions charriées vers les basses altitudes ont alors partiellement comblé le cratère nord.

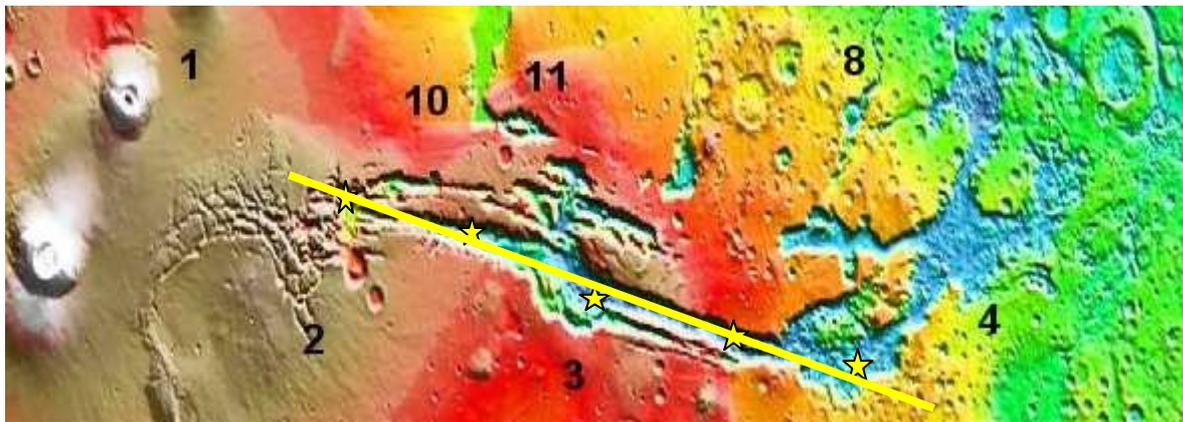


Fig. 21. Résultat du calcul des interférences sur Mars. Les 5 points calculés sont les étoiles jaunes. La droite moyenne rend compte des 4000 km de Valles Marineris.

Cette hypothèse doit certainement être affinée. Il faut notamment confirmer l'existence du cratère nord et connaître les datations de chacun des cratères. L'intervalle de temps (sans doute très court) entre les deux impacts fait aussi partie des incertitudes ainsi que la vitesse des ondes. A noter que si les deux impacts sont simultanés, la vitesse des ondes est indifférente.

Si on accepte cette interprétation, elle devrait pouvoir s'appliquer à d'autres corps du système solaire (Vénus, Mercure ou des satellites de planètes). Réciproquement, les études de ce phénomène qui n'a pas été perturbé sur Mars pourraient aider à comprendre la physique des événements qui se sont produits sur Terre et qui ont subi, eux, d'importantes évolutions.

Prédiction d'un évènement passé, en -128 Ma !

Sur la **figure 10**, il ne semble plus rester de grandes structures qui n'aient pas été intégrées dans les différents évènements. Le seul endroit du Gondwana où un effet de plusieurs milliers de km n'a pas été trouvé concerne son bord ouest qui court le long de l'Australie et l'Antarctique. Pourquoi aurions-nous là une «anomalie» qui échappe au processus des interférences ? La question serait donc de trouver la paire d'impacts qui puisse en rendre compte. Le même raisonnement que celui qui a conduit à la découverte du cas de Morokweng en Afrique du sud peut être appliqué ici.

La forme de la côte occidentale australienne suggère la possibilité d'un cercle osculateur, en rouge sur la **figure 22**. Les branches de pseudo hyperboles courent le long de la côte jusqu'à la Tasmanie et à l'est des hauts fonds de la mer de Corail. Au centre du cercle se trouve tout naturellement le cratère de Tookoonooka, 55 km de diamètre et daté de -128 Ma. Le premier candidat étant trouvé et daté, le rayon vecteur issu du centre indique la direction du deuxième impact.

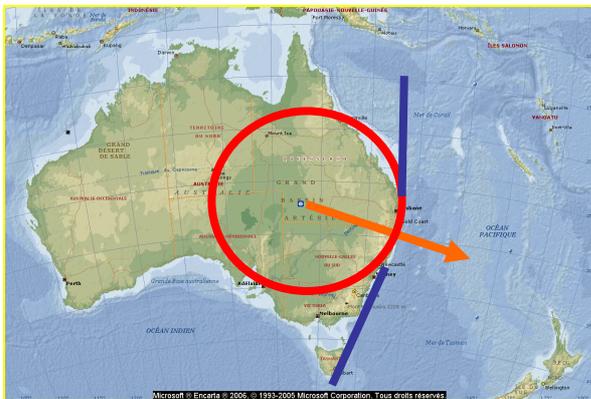


Fig. 22. Côte ouest de l'Australie. Le cercle est centré sur le cratère de Tookoonooka. En bleu figurent les branches d'interférences possibles ; le vecteur rouge matérialise la direction attendue du deuxième impact d'astéroïde.

Il faut ensuite reporter ce rayon vecteur sur une reconstitution à l'époque de l'évènement, en -128 Ma. La carte ODSN en projection polaire (**figure 23**) montre que la direction présumée passe à environ 200 km d'un point chaud répertorié. C'est celui des actuelles îles Balleny.

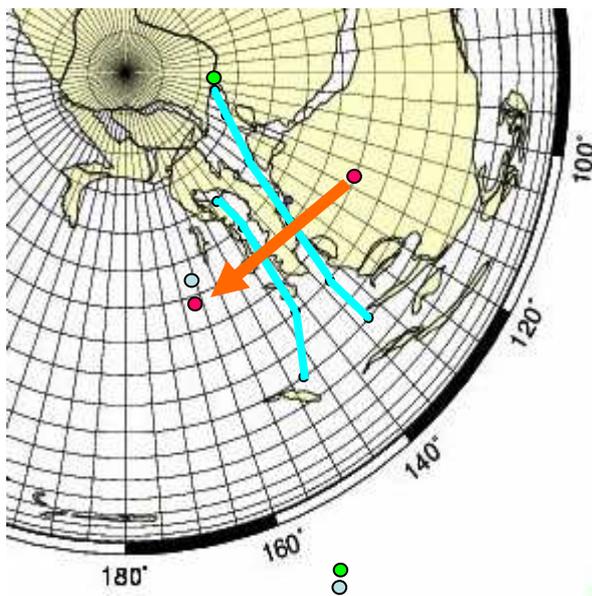


Fig. 23. Interférences le long de la côte australienne depuis l'est de la mer de Corail jusqu'à la mer de Ross. Les points rouges correspondent aux positions d'impact, le point gris aux îles Balleny et le point vert au futur volcan Erebus.

D'après la première partie, qui établit une corrélation de voisinage entre impacts et points chauds, nous pouvons donc penser que c'est à cet endroit que se trouve le deuxième impact, celui qui est recherché. Comme l'évènement est daté de -128 Ma, le point chaud a eu tout le temps de « mûrir » et donc d'être catalogué. Il y a 3000 km de distance entre les deux impacts.

L'étape suivante consiste à affiner les paleo-positions de chaque cratère et de calculer le système d'interférences qu'ils ont pu créer. Le programme ODSN donne directement la position de Tookoonooka. Après quelques itérations, le meilleur compromis donne les lieux d'interférences tracés sur la **figure 23**. Les éléments du calcul sont :

Position de l'impact « Balleny »	163°	-58 °
Position de l'impact Tookoonooka	112,8°	-55,2°
Temps entre impacts	3,356 h	

La vitesse des ondes est de 6,58 km/s et les interférences se produisent sur la côte australienne après que les ondes émises par le premier impact ont parcouru 2 tours terrestres. Sur 4500 km, le lieu géométrique suit les contours attendus depuis la mer de Corail jusqu'au fond de la mer de Ross dans l'Antarctique et au Mont Erébus.

La dernière étape est de retrouver la position actuelle du cratère. Grâce au programme ODSN, on peut estimer la position actuelle du cratère vers 174° et -30° avec une incertitude supérieure à 2°. En examinant la carte de fonds de mer établie par le CNES et l'IRD (19), on note une structure circulaire de 60 à 80 km de diamètre à proximité de l'endroit attendu. Elle est située par 2500 m de profondeur, dans une zone peu affectée par les sédiments et aux coordonnées : **173° et -28°**

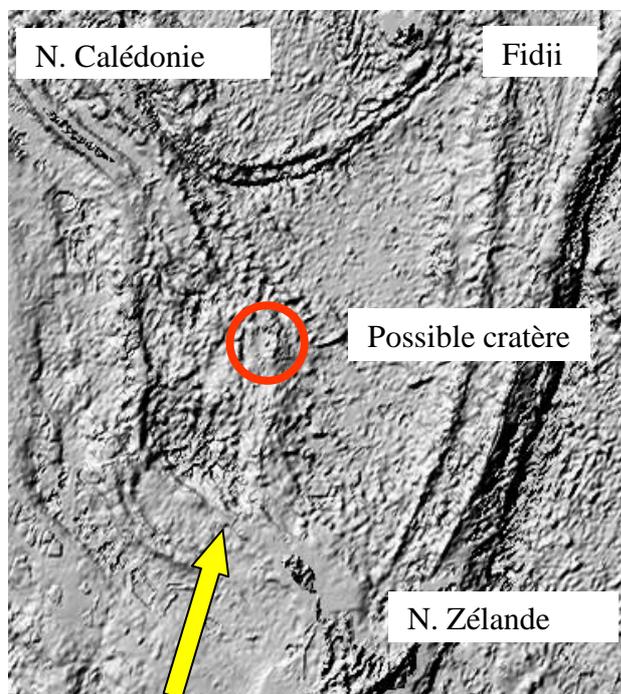


Fig. 24 Possible localisation d'un cratère d'impact d'astéroïde qui serait tombé en -128 Ma et qui appartiendrait à la même famille que le météorite de Tookoonooka. Carte CNES-IRD.

Si ce cratère existe, et s'il est confirmé par des relevés et des prélèvements, il constituerait une validation significative de toute l'approche qui vient d'être développée dans cet article.

Références et notes

1. B.M. French, 1998, Traces of Catastrophe, Lunar and Planetary Institute, Houston, Tx, 120 p.
2. [J. Spray](#) and [J. Hines](#), Site developed and maintained by Planetary and Space Science Centre, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada.
<http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/index.html>
3. R.R. von Frese, L. Potts, et al, 2006. Eos Trans. AGU, Jt. Assem. Suppl. 87(36): Abstract T41A-08
4. L. Becker, R. J. Poreda, A. R. Basu, K. O. Pope, T. M. Harrison, C. Nicholson, R. Iasky, Science 4 June 2004: Vol. 304. no. 5676, pp. 1469 – 1476
5. W. W. Hay, R. DeConto, Wold, C.N et al, 1999, in Barrera, E. and Johnson, C. (eds.), The Evolution of Cretaceous Ocean/Climate Systems, Geological Society of America Special Paper 332, pp. 1-47. <http://www.odsn.de/odsn/services/paleomap/paleomap.html>
6. A. Cox and R. B. Hart, 1986, Oxford, UK, Blackwell Scientific Publications
7. R. D. Mueller, J.-Y. Royer and L. A. Lawver, 1993, Geology, 21, p. 275-278.
8. V. Courtillot et al., 2003, Earth and Planetary Science Letters 205, 295-308
9. M. F. Coffin, M. S. Pringle et al., 2002, Journal of Petrology, 43, p 1121-1139.
10. C. R. Scotese, 1997. Paleogeographic Atlas, PALEOMAP Progress Report 90-0497, Department of Geology, University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, 37 pp.
11. L.A. Lawver, I.W.D. Dalziel, L.M. Gahagan, K.M. Martin, and D. Campbell, 2002, <http://www.ig.utexas.edu/research/projects/plates/>
12. P. Michel, W. Benz, P. Tanga, D.C. Richardson, 2001. Science, 294, pp. 1696-1700.
13. P. Michel, W. Benz, D.C. Richardson, Nature, 2003, 421, pp. 608-611
14. R.E. Ernst and Kenneth L. Buchan, 2001, Geological Society of America Special Paper 352, Database : http://gdcinfo.agg.nrcan.gc.ca/app/magmatic/igneous_db_e.html
15. S.E. Bryan, T.R. Riley, D.A. Jerram et al., 2002, Geological Society of America, special paper 362.
16. E. Morin, 1990, Introduction à la pensée complexe, ESF éditeur, Paris, p32.
17. J. Ritsema, H.J. van Heijst, J.H. Woodhouse, 1999, Science 286, pp 1925-1928.
18. L. Gernigon, J.C. Ringenbach, S. Planke, B. Le Gall, 2004, Marine and petroleum geology, 21, 3, pp 363-372.
19. S. Calmant, A. Cazenave, M. Bergé-Nguyen, 2006, Editions IRD, Cartes et Notices N° 116
20. Je remercie F. Lelièvre (Alcatel-Lucent) pour sa contribution informatique décisive et des discussions prolifiques. J'exprime toute ma gratitude à J.F. Lénat et O. Merle (Magmas et Volcans, Clermont Ferrand, France) pour leurs avis, commentaires et suggestions. Je remercie également F. Perrier dont l'aide théorique et pratique en systémique a permis d'aborder avec sérénité les systèmes complexes "ouverts".
I thank the Ocean Drilling Stratigraphic Network staff for their site and computing facility dedicated to provide and share information about data related with the DSDP (Deep Sea Drilling Project) and ODP (Ocean Drilling Program) drilling campaigns. This public support was a major opportunity for this work.