TRAITEMENT ET INTERPRÉTATION DES DONNÉES SATELLITAIRES DE CHAMPS DE POTENTIELS.
CAS DES OBSERVATIONS MAGNÉTIQUES DE LA SONDE LUNAR PROSPECTOR.

Mohamed Cherif BERGUIG[1], Mohamed HAMOUDI[2], Jean-Louis LE MOUËL[3], Yves COHEN[4]

[1,2]Département de Géophysique FSTGAT/USTHB BP 32 Al-Elia Bab-Ezzouar 16111, Algérie, berguig@ipgp.fr
[3]Institut de Physique du Globe de Paris 4, Place de Jussieu 75253 Paris, France, lemouel@ipgp.fr
[4]Institut de Physique du Globe de Paris 4, Avenue de Neptune 94107 Saint-Maur, France, cohen@ipgp.fr

Soumis le 2 février 2010 ; accepté le 13 octobre 2011 - © *Revue Télédétection*, 2011, vol. 10, n° 2-3, p. 65-75

Résumé :

Dans ce travail nous présentons une étude du champ magnétique de la Lune à partir des mesures satellitaires collectées par la sonde américaine Lunar Prospector (LP). Les méthodes et algorithmes développés pour le traitement et l'interprétation des mesures magnétiques (LP-MAG) acquises durant l'année 1999 ont permis d'obtenir une cartographie globale du champ magnétique interne de la Lune. En l'absence de tout autre critère, la validation de la cartographie obtenue a été faite en utilisant les propriétés des fonctions harmoniques. Cette cartographie globale confirme la nature crustale du champ magnétique lunaire et montre également que les anomalies magnétiques les plus intenses sont localisées aux antipodes des grands bassins (Orientale, Serenitatis, Imbrium, et Crisium) ayant un âge de l'ordre de 3.9 Ga et/ou sont associées aux structures de fort albédo. La croûte de ces bassins eux-mêmes est faiblement aimantée pouvant même être complètement désaimantée.

Mots clefs : Lunar Prospector, cartographie, Anomalie magnétique, Bassins, albédo, âge imbrien.

PROCESSING AND INTERPRETATION OF SATELLITE MEASUREMENTS OF POTENTIAL FIELDS. CASE OF LUNAR PROSPECTOR MAGNETOMETER DATA.

Abstract :

We present a new study of the lunar magnetic fields using advanced methods and algorithms to select and process Lunar Prospector Magnetometer data (LP-MAG). These methods and algorithms have allowed us to derive a global model of the internal lunar magnetic field from the LP-MAG data acquired at low altitude, over 1999. To validate the results, we have developed a method based on properties of the potential fields, where the horizontal North and East components are derived from the vertical component, only. The obtained results confirm the crustal origin of the sources and show that the strongest anomalies are associated with formations of high albedo and/or are antipodal to large young basins (Orientale, Serenitatis, Imbrium, and Crisium) of age about 3.9 Ga. These basins are characterized by very weak anomalies.

Key words: Lunar Prospector, Mapping, Magnetic Anomaly, Basins, Albedo, Imbrean age.

1. INTRODUCTION

L'étude scientifique de Lune n'a commencé réellement qu'avec l'ère spatiale Apollo et Luna de la décennie soixante-dix. Ainsi, les données magnétiques Apollo ont été à la base de toute la cartographie préliminaire du champ magnétique de la Lune. Néanmoins la couverture était peu dense, limitée à une mince bande équatoriale n'a pas permis d'étendre l'étude à toute la surface lunaire.

Dans un souci de réaliser une couverture géophysique et géochimique globale de la Lune, la NASA mettait, en 1998, en orbite lunaire la sonde LP. L'inclinaison quasi polaire de l'orbite, l'instrumentation scientifique variée ainsi que les 19 mois de durée de la mission ont permis de réaliser une couverture globale de l'astre (Binder, 1998). Dans ce travail, nous nous intéresserons, aux données magnétiques vectorielles de la sonde LP collectées à basse altitude durant l'année 1999. La Lune est aujourd'hui dépourvue d'un champ magnétique global semblable à celui de la Terre (Ness, 1971; Russel *et al.*, 1977). Ainsi, le vent solaire interagit directement avec la surface de la Lune. De ce fait la majorité des données vectorielles LP-MAG ont été fortement perturbées par le plasma solaire surtout durant l'année 1999 qui coïncidait avec le maximum du 23^{e} cycle de l'activité solaire (Cliver *et al.*, 1999). Ainsi la première phase dans la chaine du traitement des données LP-MAG consiste à séparer les champs interne et externe. Les méthodes classiques utilisées (Berguig *et al.*, 2008 ; Hood *et al.*, 2001 ; Hood et Artemieva, 2008 ; Purucker 2008 ; Richmond et Hood 2008 ; Richmond *et al.*, 2005) ne prennent pas en considération la nature potentielle du champ magnétique externe. De ce fait les erreurs générées par l'application de ces méthodes peuvent avoir des amplitudes comparables à celles des anomalies (Hood *et al.*, 2001; Richmond *et al.*, 2005 ; Thébault *et al.*, 2008).

L'approche développée dans ce travail tient compte de l'ensemble des inconvénients des méthodes usuelles appliquées jusqu'ici aux données magnétiques lunaires Apollo et LP-MAG.

Résumons ces premiers résultats. Ainsi, les données LP-MAG sélectionnées par ces méthodes ont permis d'associer les anomalies magnétiques lunaires les plus intenses aux certaines formations de fort albédo telles que Reiner γ (Hood *et al.*, 2001; Nicholas *et al.*, 2007 Kurata *et al.*, 2005), les formations Descartes (Richmond *et al.*, 2003) et le cratère Airy (Mitchell *et al.*, 2008 ; Purucker 2008 ; Richmond et Hood 2008). Les formations antipodales aux grands bassins d'âge imbrien autour de 3.9 Ga tels que Mare Imbrium, Mare Orientale, Mare Serenitatis et Mare Crisium sont également associées aux fortes anomalies magnétiques (Berguig *et al.*, 2008 ; Halekas *et al.*, 2001 ; Hood *et al.*, 2001; Richmond et Hood 2008). Les différents traitements des données LP-MAG ont conduit à l'établissement des cartes magnétiques globales préliminaires (Purucker 2008; Richmond et Hood 2008). Ces cartes préliminaires ont permis de mettre en évidence de nouvelles anomalies notamment celles au dessus de Mare Moscoviense sur la face visible. Ces cartes présentent en général une couverture et une résolution assez faible notamment pour les longitudes allant de 330^0 à 360^0 (Mitchell *et al.*, 2008; Richmond et Hood, 2008).

De plus le champ magnétique interne n'a pas été validé et de ce fait des anomalies associées au champ externe peuvent être identifiées sur la carte de Richmond et Hood 2008. Ces anomalies magnétiques d'origine externe sont remarquables, notamment au-dessus de la région antipodale au bassin Crisium aux environs de 238^0 E au sud du cratère Gerasimovich.

Pour remédier à cet inconvénient nous avons établi un algorithme de validation des résultats obtenus. Nous tentons également d'apporter quelques éléments de réponse à la problématique majeure de l'origine du champ magnétique de la Lune.

Pour atteindre cet objectif nous avons développé des outils de traitement des données satellitaires LP-MAG basés sur les propriétés mathématiques des fonctions harmoniques. Nous établissons une carte magnétique vectorielle globale de haute résolution contribuant ainsi à la compréhension des sources des ces anomalies magnétiques que présente la surface lunaire.

2. SÉPARATION DES CHAMPS EXTERNE ET INTERNE

Les méthodes classiques de sélection des données magnétométriques satellitaires telles Apollo ou LP-MAG sont essentiellement basées sur l'utilisation des mesures peu perturbées par le vent solaire. Pour cela, l'analyse des données est limitée aux choix des orbites et/ou segments d'orbites lorsque les satellites se trouvent dans un environnement magnétique lunaire calme (Berguig *et al.*, 2008; Hood *et al.*, 2001; Richmond *et al.* 2003; Richmond *et al.*, 2005). En particulier lorsque :

- la Lune se trouve dans la queue géomagnétique.
- la Lune est exposée au vent solaire et le satellite se trouve dans l'ombre.

Ces méthodes de sélection ont limité la couverture magnétique LP-MAG de la Lune à près de 40%. (Berguig *et al.* 2008; Hood *et al.* 2001; Richmond et al 2005).

Pour obtenir une couverture globale, nous étions amenés à analyser toutes les données LP-MAG de l'année 1999 indépendamment de l'environnement magnétique de la Lune. La figure 1 montre l'environnement magnétique lunaire.

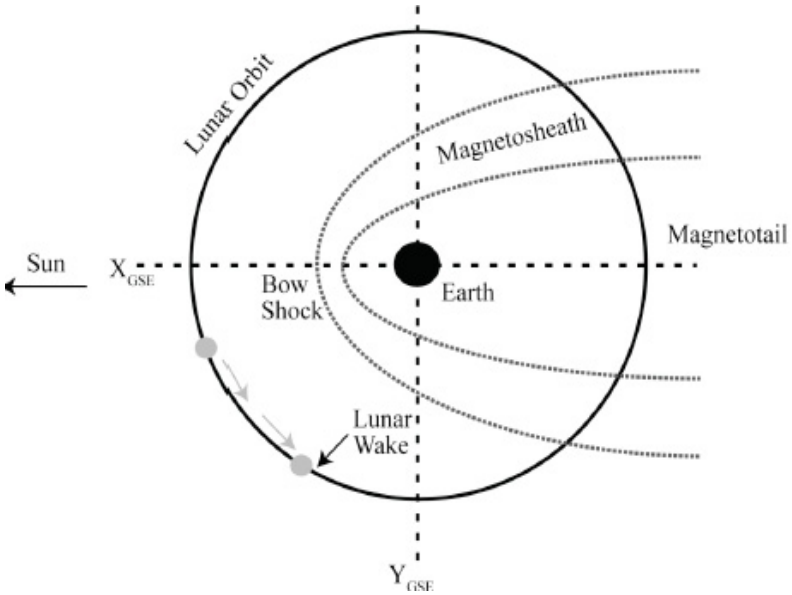


Figure 1 : Schéma représentant l'orbite lunaire autour de la Terre
et les différentes conditions magnétiques tiré de Richmond et Hood 2008.

Le choix du traitement des données LP-MAG de l'année 1999 est dicté par le fait qu'elles ont été collectées à des basses altitudes allant de 45 km à 15 km (Binder, 1998). Ainsi, la résolution spatiale dans ce cas est-elle beaucoup meilleure que dans le cas des données de l'année 1998 collectées à des hautes altitudes de l'ordre de 100 km.

L'étape cruciale dans le traitement des données magnétiques satellitaires est la séparation des contributions interne et externe. La méthode classique consiste à représenter les composantes du champ externe par des polynômes de bas degré et à soustraire les valeurs du polynôme des valeurs observées des composantes $(B_r, B_\theta, B_\varphi)$. Le champ des différences, représentent le champ d'anomalies crustales, est de moyenne nulle sur le domaine de calcul (Berguig *et al.*, 2008 ; Hood *et al.* 2001 ; Richmond et Hood 2008; Richmond *et al.*, 2005; Richmond *et al.*, 2003).

Cette méthode peut engendrer des erreurs importantes, surtout dans les régions polaires. Pour les minimiser, on a proposé, par exemple, de calculer un polynôme d'ajustement sur chaque segment d'un huitième d'orbite (Richmond et Hood 2008).

Une autre méthode développée par (Purucker, 2008) consiste à représenter le champ externe par un champ uniforme (donc de degré 1 et d'ordre 0), calculé à partir des données recueillies quand la Lune se trouve dans la queue géomagnétique. La composante zonale du modèle est nulle pour un champ parallèle à l'axe de la Lune; La composante B_φ ne se trouve pas donc réduite de la contribution externe.

L'examen attentif des mesures magnétiques des trois composantes du champ durant une journée entière montre des oscillations harmoniques de longues périodes (figure 2). Certaines des ces oscillations ont une périodicité qui coïncide avec la période de rotation du satellite LP. Des discontinuités au niveau des passages aux pôles ont également été observées. Ces observations dénotent la nature harmonique des signaux LP-MAG mesurés nous ont permis d'appliquer des théories mathématiques adéquates.

Ainsi, la méthode que nous avons développée tient compte des limitations mentionnées ci-dessus. Elle consiste à déterminer un champ de potentiel externe de degré variable de 1 à 2 et d'ordre variable. Ses contributions sur les trois composantes sont réduites simultanément.

Depuis l'époque de Gauss (Chapman et Bartels, 1940) une manière simple de décrire un champ magnétique est de l'exprimer, en dehors des sources causatrices, sous forme d'un développement en harmoniques sphériques. Le potentiel dont dérive le champ externe est donné par l'équation ci-dessous :

$$V_e = \sum_{n=1}^{N\max} \left(\frac{r}{a}\right)^n \sum_{m=0}^{n} (q_n^m \cos m\varphi + s_n^m \sin m\varphi) P_n^m(\cos\theta) \qquad (1)$$

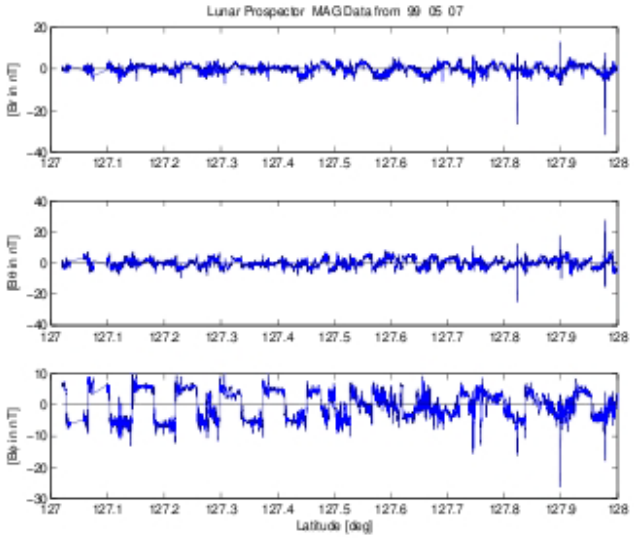


Figure 2 : Exemple de donnée LP-MAG : journée du 05 mai 1999.
Les trois composantes et sont représentées. Les abscisses sont exprimées en jour décimal.
LP-MAG raw data of the 05th may 1999. Three components are plotted in decimal day.

Où a est le rayon de la Lune pris égal à 1738.4 km et r=a+alt., où alt est l'altitude du point de mesure. Nous déterminons par une méthode inverse les coefficients q_n^m et s_n^m du potentiel externe d'un degré $N_{\max} \leq 2$ et d'ordre m = 0 à 2 pour chaque demi-orbite. Les composantes de ce modèle de champ externe sont soustraites aux mesures.

Cette méthode prend bien en compte la variabilité des altitudes ainsi que l'ordre m variable qui permet de modéliser l'ensemble des composantes externes, y compris B_φ.

Notons que les coefficients q_n^m et s_n^m sont calculés à partir des données distribuées sur un segment de ligne, pas sur une sphère on pourra dire qu'on calcule un pseudo-potentiel. La méthode sera justifiée par l'application aux demi-orbites à toutes les données LP-MAG collectées durant l'année 1999. La figure 3 montre les trois composantes du champ d'anomalie magnétique au dessus du cratère Gerasimovich. Le champ résiduel est de moyenne nulle. Notons que l'application de cet algorithme a permis également de corriger les sauts observés parfois au niveau des passages polaires.

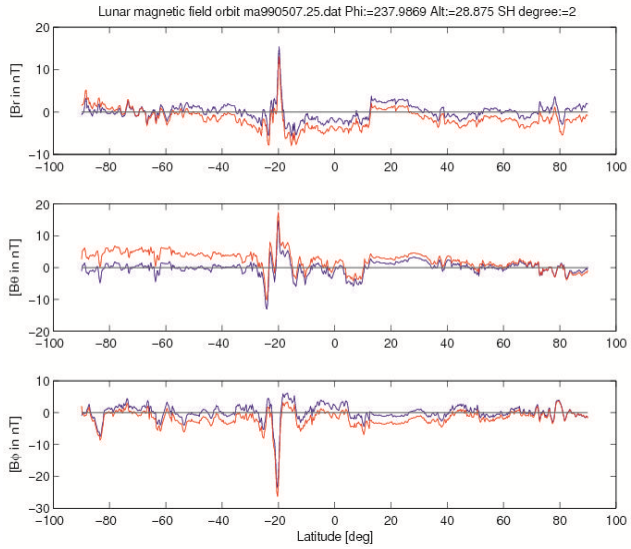


Figure 3 : Courbes montrant les données avant (en rouge) et après (en bleu) séparation du champ externe modélisé.
L'anomalie magnétique se rapporte au cratère Gerasimovich.
Plots of lunar magnetic anomalies over Gerasimovich crater before (in red) et after (in blue) minimisation of external magnetic field.

En l'absence d'informations *a priori*, notre seul critère de sélection des anomalies magnétiques lunaires intrinsèques est principalement la répétitivité des anomalies pour des demi-orbites adjacentes. Sur la figure 4 est représentée l'intensité de l'anomalie magnétique au-dessus de la célèbre formation Reiner γ de fort albédo (les latitudes proches de proche de 8° N) et la formation Rima Sirsalis (les latitudes proche de 16°S) pour des orbites proches.

Nous avons obtenu par cette méthode de sélection basée sur la répétitivité des anomalies, un nombre de points de mesures du champ magnétique interne de l'ordre de 417379 pour un nombre total d'observations à basse altitude de prés de 3800000 soit environ 10%.

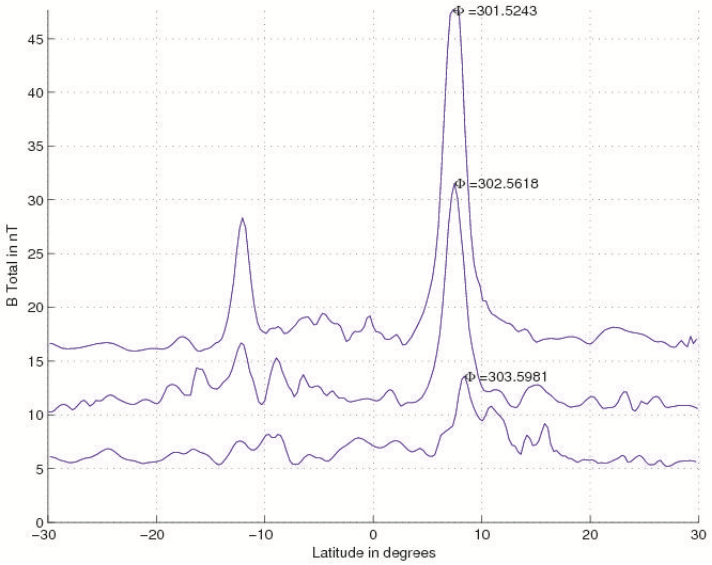


Figure 4 : Courbes montrant l'intensité de l'anomalie magnétique au-dessus des formations Rima Sirsalis et Reiner γ pour des orbites adjacentes.

Plots of repetitive magnetic anomalies over Rima Sirsalis and Reiner γ for adjacent orbits.

3. VALIDATION DES DONNÉES SÉLECTIONNÉES.

Notre critère est d'homogénéité qualitative (l'examen visuel des courbes proches). Aussi, avons-nous jugé utile de valider nos résultats en exploitant les propriétés des fonctions harmoniques. Cette méthode est basée sur le principe suivant: le champ magnétique $\vec{B}$ d'origine interne, en dehors des sources de courants, dérive d'un potentiel scalaire V :

$$\vec{B} = -\vec{\nabla} V \tag{2}$$

En coordonnées cartésiennes le potentiel scalaire et les composantes du champ sont reliés comme suit :

$$B_x = -\frac{\partial V}{\partial x},\ B_y = -\frac{\partial V}{\partial y} \text{ et } B_z = -\frac{\partial V}{\partial z} \tag{3}$$

Ainsi, en utilisant les propriétés des transformations de Fourier, il est aisé de démontrer que dans un système de coordonnées cartésiennes, les composantes vectorielles Verticale descendante $\hat{B}_z$, Horizontale Nord $\hat{B}_x$ et Horizontale Est $\hat{B}_y$ dans le domaine fréquentiel peuvent être écrites de la marinière suivante (Blakely, 1996, LeMouël, 1969):

$$\hat{B}_x = -ik_x\hat{V},\ \hat{B}_y = -ik_y\hat{V} \text{ et } \hat{B}_z = -k_z\hat{V} \tag{4}$$

Où $\hat{V}$ est le potentiel scalaire dans le domaine fréquentiel, $i = \sqrt{-1}$ est un imaginaire pur, k_x et k_y sont les nombres d'ondes dans les directions O_x et O_y et k_z le nombre d'onde suivant la direction O_x est donné par la relation :

$$k_z = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \tag{5}$$

Ainsi, les composantes horizontale Nord B_x et horizontale Est B_y peuvent être exprimées comme suit :

$$\hat{B}_x = \frac{k_x}{k_z}\hat{B}_z \quad \text{et} \quad \hat{B}_y = \frac{ik_y}{k_z}\hat{B}_z \tag{6}$$

Ces équations montrent que dans le cas de l'approximation plane (suffisante dans les exemples traités), la composante verticale B_z permet d'accéder aux deux autres composantes horizontales B_x et B_y. Les figures 5 et 6 montrent les résultats de l'application de l'algorithme pour les anomalies magnétiques localisées aux antipodes des grands bassins ainsi qu'au dessus de la formation Reiner γ.

Cette méthode de validation permet également de filtrer des signaux externes présents sur les composantes horizontales. Les résultats obtenus par l'application de cet algorithme (figure 5 et 6) montrent bien que les données sélectionnées représentent effectivement un champ magnétique dû à des sources internes.

Cette approche montre clairement que toute l'information magnétique du champ de la croûte est bien contenue dans la composante verticale. De plus, l'algorithme développé ici peut en outre être appliqué pour réduire le signal externe sur les deux composantes horizontales et réaliser des prolongements locaux.

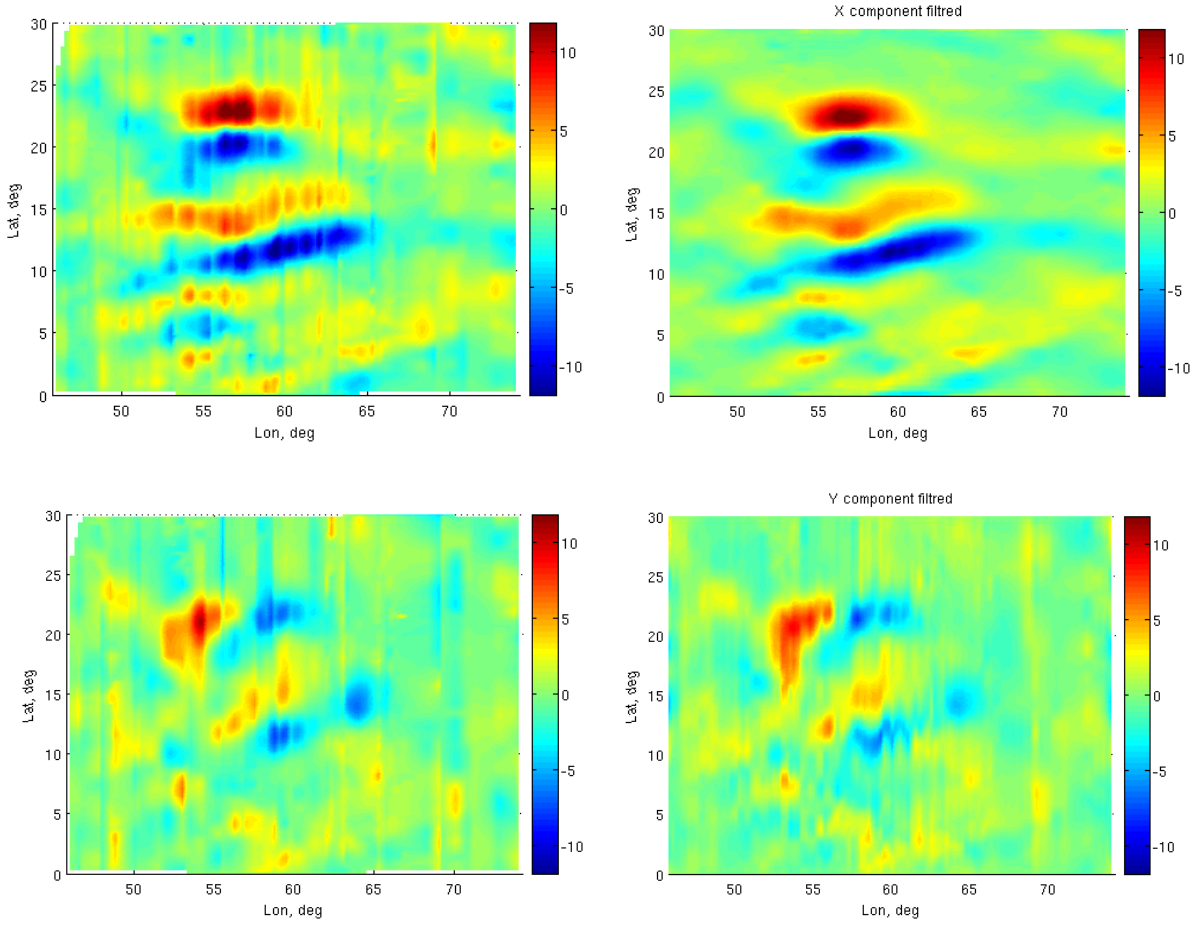


Figure 5 : Cartes montrant l'application de l'algorithme de validation des résultats au dessus du grand bassin Crisium. Haut) (Gauche) Composante Nord mesurée à l'altitude du satellite. (Droite) Composante Nord déduite de la composante Radiale. Bas) (Gauche) Composante Est mesurée à l'altitude du satellite. (Droite) Composante Est déduite de la composante Radiale.
Maps showing the application of the algorithm of results validation over the large Crisium basin. Top) (Left) North component measured at the altitude of the satellite. (Right) Northern Component deducted from the radial component. Bottom) (Left) component is measured at the altitude of the satellite. (Right) component is derived from the radial component.

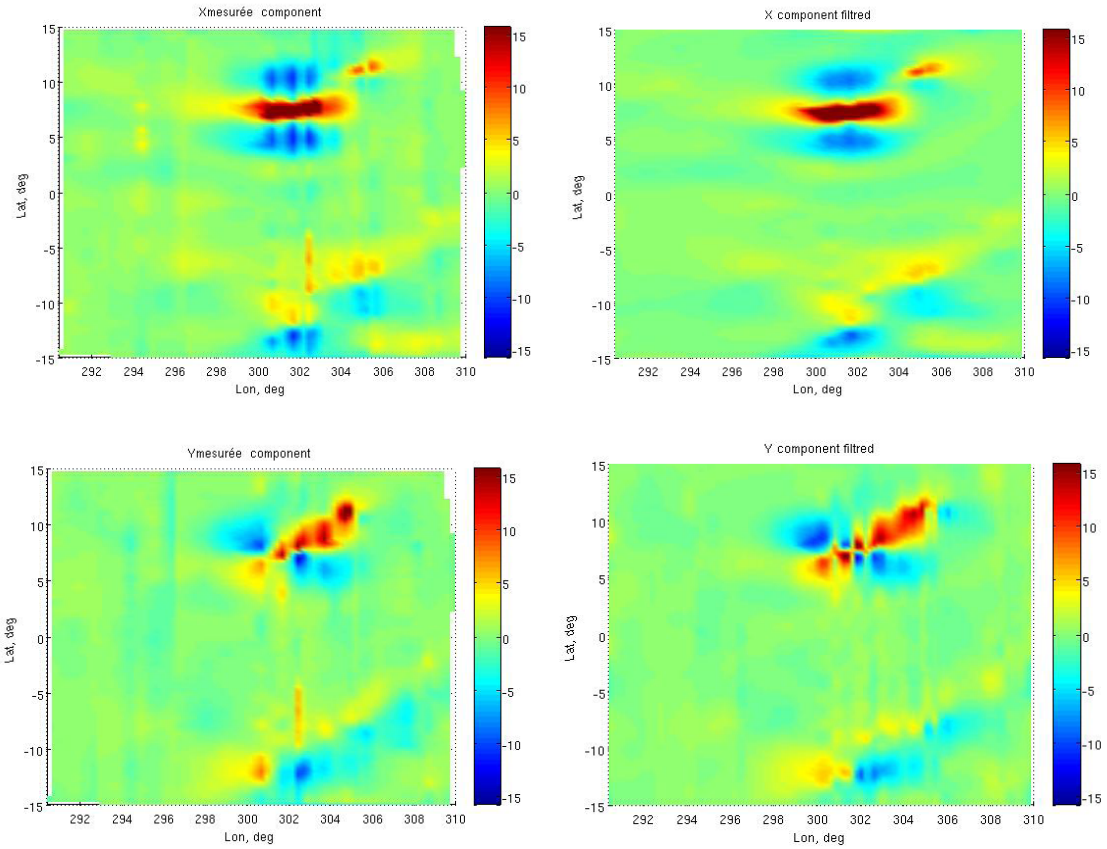


Figure 6 : Cartes montrant l'application de l'algorithme de validation des résultats au-dessus de la formation Reiner γ. Haut) (Gauche) Composante Nord mesurée à l'altitude du satellite. (Droite) Composante Nord déduite de la composante Radiale. Bas) (Gauche) Composante Est mesurée à l'altitude du satellite. (Droite) Composante Est déduite de la composante Radiale.
Maps showing the application of the algorithm validation results over the Reiner γ formation. Top) (Left) North component measured at the altitude of the satellite. (Right) Northern Component deducted from the radial component. Bottom) (Left) component is measured at the altitude of the satellite. (Right) component is derived from the radial component

4. CARTOGRAPHIE GLOBALE DU CHAMP MAGNÉTIQUE DE LA LUNE.

La méthode de sélection des données appliquée aux données LP-MAG de l'année 1999 a permis d'obtenir une couverture globale de près de 90% de toute la surface de la Lune. Sur la figure 7 est montrée la distribution des données LP-MAG ayant servi pour cartographier les trois composantes vectorielles du champ magnétique lunaire. Cette figure illustre bien que la plupart des structures lunaires sont mieux couvertes par les données en latitude qu'en longitude. Ainsi, la résolution spatiale sur les latitudes est très fine atteignant les 8 km à l'altitude du satellite. Notons également que les régions qui limitent les deux faces visible et cachée ont une densité de données relativement faible. La couverture de la partie centrale autour de la longitude 0° E est également peu dense et ce par manque de données exploitables. La méthode de sélection a permis d'obtenir également une couverture multiple de nombreuses structures lunaires à altitudes différentes et pour des environnements magnétiques différents.

En effet les cartes magnétiques globales des trois composantes du champ d'anomalies représentée sur les deux figures 8 et 9 montrent bien que les formations lunaires intéressantes telles que les zones antipodales et les grands bassins d'impacts ont été cartographiées. Cette cartographie magnétique globale est en bon accord avec les résultats partiels des travaux antérieurs (Berguig *et al.*, 2008; Halekas at al., 2001; Hood *et al.*, 2001; Lin *et al.*, 1998). Ainsi cette carte montre-t-elle clairement que les anomalies magnétiques les plus intenses sont localisées aux antipodes des quatre grands bassins Crisium, Serenitatis, Imbrium et Orientale. L'anomalie localisée au-dessus du bassin Aitken (SPA) proche du pôle sud sur la face cachée est comparable à ces anomalies (figure 9). Il en est de même pour les anomalies liées aux formations Reiner γ Rima Sirsalis, Descartes et Airy (Halekas *et al.*, 2001; Hood *et al.*, 2001; Lin *et al.*, 1998 ; Mitchell *et al.*, 2008). Toutes ces anomalies magnétiques relativement intenses de l'ordre de 15 nT sont couvertes et bien décrites par les données sélectionnées grâce aux méthodes et algorithmes que nous avons développés.

La couverture de la surface lunaire par les données LP-MAG est nettement plus serrée et plus complète que celles établies jusque-là. Nous pouvons constater que les anomalies les plus intenses sont liées aux formations de fort albédo. En effet, toutes les formations de la bande équatoriale entre 40°N au 40°S, sur la face cachée et sur la partie Est de la

face visible, sont caractérisées par un fort albédo (Wilhelms *et al.*, 1987) et des anomalies magnétiques relativement bien marquées. Il n'est pas clairement établi quelles propriétés magnétiques influencent les propriétés optiques, ou inversement. Les mini magnétosphères crées par l'aimantation de ces formations d'âge imbrien ont probablement contribué à la protection de cet albédo contre les différents processus de bombardement micro météoritiques et certainement contre l'altération des roches de la surface par les particules du vent solaire (Kurata *et al.*, 2005). Quelques anomalies magnétiques d'intensité moyenne de l'ordre de 8 nT, ont été mises en évidence notamment au dessus du bassin Crisium (15°N, 16°E) et Mare Moscoviense (25°N, 150°E). Ces aimantations ont été acquises très probablement pendant la formation des bassins vers 3.8 à 3.9 Ga (Halekas *et al.*, 2001, Richmond et Hood 2008). L'étude de quelques directions d'aimantations de ces formations apporte des arguments en faveur d'une paléo-dynamo (Berguig *et al.*, 2001), bien qu'une autre interprétation de ces anomalies est avancée par (Hood et Artemieva, 2008 ; Richmond *et al.*, 2005). Cette interprétation est basée essentiellement sur l'hypothèse de la création de ces anomalies magnétiques par un processus externe tels que les impacts météoritiques. L'anomalie liée à Mare Crisium est sise à l'ouest de l'anomalie attribuée à Mare Marginis, aux antipodes du bassin Orientale ont très probablement comme sources les mêmes éjecta.

D'autres anomalies magnétiques relativement intenses dont l'amplitude peut-être aussi de 8 nT sont mises en évidence pour la première fois. Tel est le cas, par exemple, de l'anomalie située vers (30°S, 90°E) au voisinage du cratère Abel, ou celle située vers (40°N, 4°E) près du cratère Stöler ainsi que l'anomalie centrée sur (12°N, 280°E) au dessus du cratère Hartwig. Ces formations ont très probablement un âge proche de l'imbrien de 3.8 à 3.9 Ga (Wilhelms *et al.*, 1987). Elles sont également caractérisées par un fort albédo et sont semblables aux formations Descartes et Reiner γ.

Les grands bassins d'impact tels que Orientale, Serenitatis et Imbrium sont caractérisés par des anomalies magnétiques de faibles amplitudes, de l'ordre de 2 à 4 nT. La distribution des anomalies magnétiques montre bien que les brèches et les éjecta sont plus fortement aimantés que les laves des mers lunaires.

Un des arguments en faveur de notre carte d'anomalies réside dans sa très haute résolution comparable à celle de la méthode de réflectométrie ER car nous arrivons à mettre en évidence les signatures magnétiques associées aux structures linéaires telles les rainures, à l'exemple de Rima Sirsalis qui est également une structure d'âge imbrien.

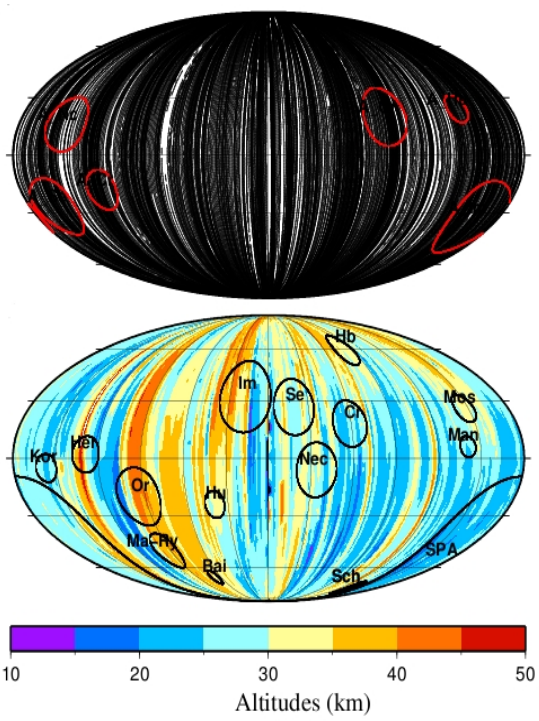


Figure 7 : Cartes Montrant la distribution des données LP-MAG ayant servi pour cartographier le champ magnétique de la Lune et leurs altitudes correspondantes. Haut). Les données LP-MAG sélectionnées par les algorithmes. Bas) Variation des altitudes des données LP-MAG sélectionnées. L'échelle des couleurs est en km. Le système de projection pour toutes les cartes est Mollweide centré sur la longitude 0° E.

Maps showing the coverage of LP-MAG data used to map the lunar magnetic field with their corresponding altitudes. Top) The LP-MAG data selected by the developed algorithms. Bottom) Altitude variation of selected LP-MAG data. The colour scale is in km. The projection system for all cards is Mollweide centred on longitude 0 ° E

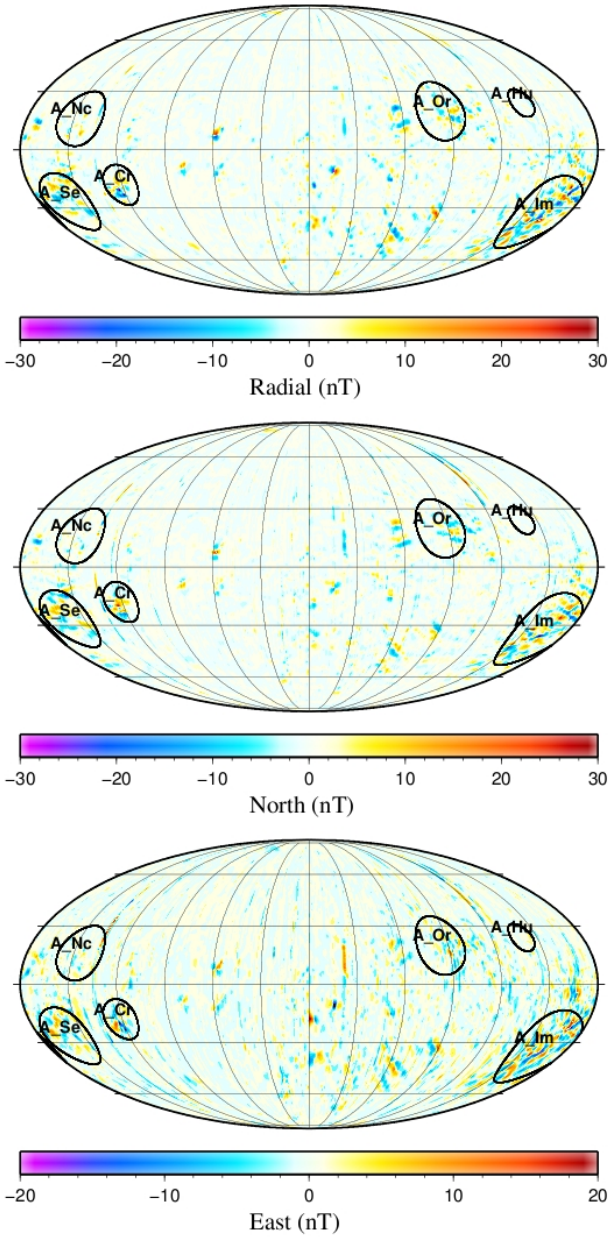


Figure 8 : Carte magnétique globale de la Lune. (Haut) Composante Radiale B_r , (Milieu) Composante B_θ et (Bas) Composante B_φ à l'altitude du satellite. Le système de projection est celui de Mollweide centré sur la longitude 0^o L'échelle des couleurs est en nT. Les cercles représentent les grands bassins d'impacts.

Maps of the global magnetic Moon. (Top) Radial component B_r (Middle) B_θ component and (Bottom) B_φ component at the altitude of the satellite. The projection system is Mollweide longitude centred on the longitude 0 ° E. The colour scale is in nT. The circles represent the large impact basins of imbrean age.

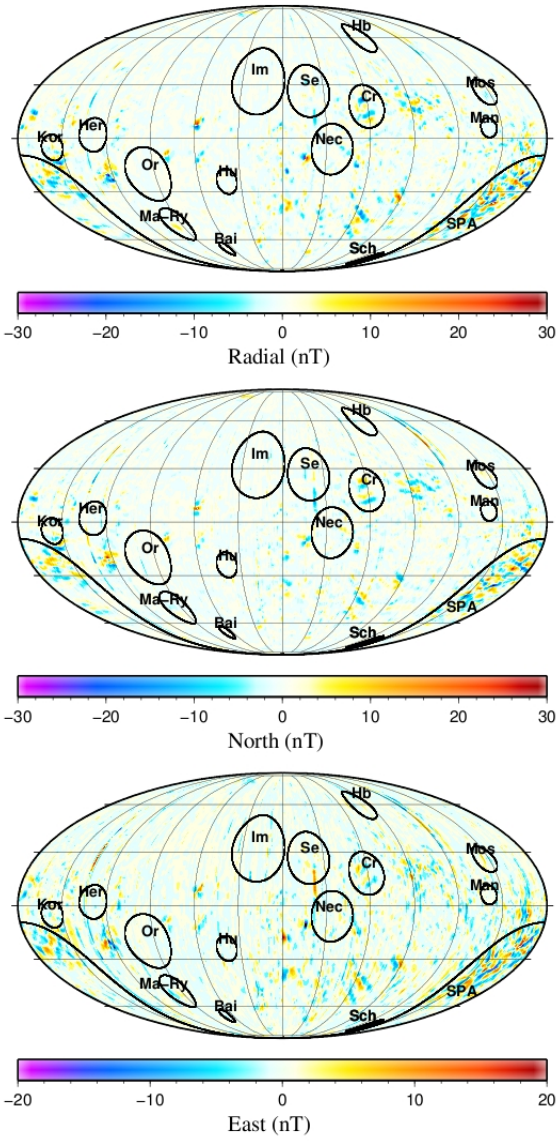


Figure 9 : Carte magnétique globale de la Lune. (Haut) Composante Radiale B_r , (Milieu) Composante B_θ et (Bas) Composante B_φ à l'altitude du satellite. Le système de projection est celui de Mollweide centré sur la longitude 0^o L'échelle des couleurs est en nT. Les cercles représentent les formations antipodales aux grands bassins d'impacts.

Map of the global magnetic Moon. Top) Radial component B_r (Middle) B_θ component and (Bottom) B_φ component at the altitude of the satellite. The projection system is Mollweide longitude centred on the longitude 0 ° E. The color scale is in nT. The circles represent the antipodal zones of the large impact basins of imbrean age..

5. CONCLUSION

Les différents traitements des données satellitaires LP-MAG ont nettement amélioré la cartographie magnétique de la Lune. Ainsi, la méthode que nous avons utilisée pour séparer les champs interne et externe permet de minimiser l'effet des tendances externes en tenant compte de sa nature potentielle. Les effets externes ont été réduits aussi bien pour les basses altitudes que pour les régions polaires.

La méthode développée pour la validation des données sélectionnées a permis également de vérifier la cohérence magnétique des anomalies mises en évidence et de filtrer les tendances externes sur les deux composantes horizontales.

Ainsi, la carte magnétique globale obtenue en utilisant les algorithmes que nous avons développés, est très précise et riche en information, ainsi l'anomalie associée à la structure linéaire Rima Sirsalis peut aisément être identifiée sur la carte.

Les fortes anomalies magnétiques sont soient liées au fort albédo soient localisées aux antipodes des grands bassins d'impact alors que ces basins eux mêmes présentent de faibles anomalies. Ces fortes anomalies sont en général bien corrélées avec les éjecta d'âge imbrien. Les anomalies d'intensités moyennes, en particulier au-dessus de Mare Moscoviense peuvent très difficilement être expliquées par une origine liée à un champ transitoire. L'aimantation thermorémanente des échantillons lunaires et le groupement des paléo-pôles des formations de fort albédo constituent ainsi des arguments en faveur d'un paléo-champ magnétique durant la période imbrienne, autour de 3.9Ga.

Remerciements :

Nous exprimons notre gratitude envers Steven J. d'avoir mis à notre disposition les données LP-MAG et LP-ER décodées dites de niveau 1.

Références

Berguig, M. C., M. Hamoudi, Y. Cohen, and E. Thébault., (2008) Lunar magnetic pole positions deduced from high albedo magnetic anomalies. Asian Journal of Science Earth 2 doi : 10.3923/ajes.2008.62.76 62_76.

Binder, A. (1998) Lunar Prospector : Overview. Science 281 P1475-476.

Blakely, R. J. (1996) Potential Theory in Gravity and Magnetic. Cambridge University Press 441 pages

Chapman, S. and J. Bartels. (1940) Geomagnetism I. Oxford, Clarendon.

Cliver, E. W., A. G. Ling, J. E. Wise, and L. J. Lanzerotti. (1999) A prediction of geomagnetic activity for solar cycle 23. J. Geophys. Res. 104 A4 : 6871-6876.

Halekas, J. S., D. L. Mitchell, R. P. Lin, S. Frey, L. L. Hood, M. H. A. na, and A. B. Binder. (2001) Mapping of crustal magnetic anomalies on the lunar near side by lunar prospector electron reflectometer. J. Geophys. Res. 106 27481-27852.

Hood, L. L., A. Zakharian, J. S. Halekas, D. L. Mitchell, R. P. Lin, M. H. Acuña, and A. B. Binder. (2001) Initial mapping and interpretation of lunar crust magnetic anomalies using lunar prospector magnetometer data. J. Geophys. Res. 106 27825-27839.

Hood, L. L. and N. A. Artemieva. (2008) Antipodal effect of lunar basin-forming impacts : Initial 3d simulations and comparisons with observations. Icarus Volume 193, Issue 2 Pages 485-502, doi:10.1016/j.icarus.2007.08.023

Kurata, M. H., Tsunakawa, Y. Saito, M. M. H. Shibuya, and H. Shimizu. (2005) Mini-magnetosphere over the reiner gamma magnetic anomaly region on the moon. Goephys. Res. Lett. 32 :L24205, doi :10.1029/2005GL024097.

LeMouël, J. L. (1969). Sur la distribution des éléments magnétiques en France. Thèse Doctrorat d'État. Université de Paris.

Lin, R. P., D. L. Mitchell, D. W. Curtis, C. W. Curtis, K. A. Anderson, C. W. Carlson, J. McFadden, M. H. A. na, L. L. Hood, and A. B. Binder. (1998) Lunar Surface Magnetic Fields and Their Interaction with the Solar Wind : Results from Lunar Prospector. Science 281 pages1480-1484.

Mitchell, D. L., J. S. Halekas, R. P. Lin, S. Frey, L. L. Hood, M. H. Acuña, and A. binder. (2008) Global mapping of lunar crustal amgnétic field by lunar prospector. Icarus. Volume 194, Issue 2, Pages 401-409, doi: 10.1016/j.ecarus.2007.10.027.

Ness N. F. (1971), Interaction of the Solar Wind with the Moon, Solar Terrestrial Physics., 159-205

Nicholas J.B.,M E. Purucker and T. J. Sabaka (2007), Age spot or youthful marking: The origin of Reiner Gamma, Geophysical Research Lett., 34,L02205, doi:1029/2006GL027794,

Purucker, M. E. (2008) A global model of the internal magnetic field of the moon based on lunar prospector magnetometer observations. Icarus Volume 197, Issue 1, 2008, Pages 19-23. doi:10.1016/j.icarus.2008.03.016

Richmond, N. and L. L. Hood. (2008). A preliminary global map of the vector lunar crustal field based on lunar prospector magnetometer data. J. Geophys. Res. 113 :doi :10.1029/2007JE002933.

Richmond, N., L. L. Hood, J. S. Halekas, D. L. Mitchell, R. P. Lin, M. H. Acuña, and A. B. Binder. (2003). Correlation of strong lunar magnetic anomaly with high-albedo region of the Descartes mountains. Geophys. Res. Lett. 30(7) :doi :10.1029/2003GL016938.

Richmond, N., L. L. Hood, J. S. Halekas, D. L. Mitchell, R. P. Lin, M. H. Acuña, and A. B. Binder. (2005) Correlation between magnetic anomalies and surface geology antipodal to lunar impact basins. J. Geophys. Res. 110 :doi :10.1029/2005JE002405

Russel, C. T., P. J. C. Jr, and G. Schubert. (1977) On deducing the magnetization of the lunar surface from orbital surveys. Phys. Earth Planet. Inter. 13 pages 386-390.

Thébault, E., V. Lesur, and M. Hamoudi. (2008) The shortcomings of the along track satellite filtering in geomagnetism. J. Geophys. Int. submitted.

Wilhelms, D. E., J. F. McCauley, and N. J. Trask. (1987) The Geologic history of the Moon. U.S. Geol. Surv. Prof. paper 1987 1384.