HAL
open science

Observation depuis le sol et analyse des émissions associées aux chutes des météorites sur la lune

El Mamoun Ait Moulay Larbi

To cite this version:

El Mamoun Ait Moulay Larbi. Observation depuis le sol et analyse des émissions associées aux chutes des météorites sur la lune. Astrophysique [astro-ph]. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2016. Français. NNT : 2016TOU30395 . tel-02004324

HAL Id: tel-02004324

https://theses.hal.science/tel-02004324v1

Submitted on 1 Feb 2019

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.

Université Fédérale
Toulouse Midi-Pyrénées

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Cotutelle internationale avec "Université Cadi Ayyad Marrakech"

Présentée et soutenue par :
AIT MOULAY LARBI El mamoun

le vendredi 30 septembre 2016

Titre :

Observation depuis le sol et analyse des émissions associées aux chutes des météoroides sur la Lune

---

École doctorale et discipline ou spécialité :
ED SDU2E : Astrophysique, Sciences de l'Espace, Planétologie

Unité de recherche :
Geosciences Environnement Toulouse

Directeur/trice(s) de Thèse :

David Baratoux

Jury :
Président :

A.Chehbouni	Dr IRD	Centres d'études spatiales de la biosphère-Toulouse

Examinateurs :

H. Chennaoui	PES	Faculté des Sciences Ain Chock
A. Jabiri	PES	Faculté des Sciences Semlalia Marrakech
S. Bouley	PA	Géosciences Paris Sud
D. Baratoux	MC	Géosciences Environnement Toulouse
Z. Benkhaldoun	PES	Faculté des Sciences Semlalia Marrakech

Observation et analyse des émissions associées aux chutes des météoroïdes sur la Lune

El mamoun ait moulay larbi

Directeurs de thèse: Zouhair Benkhaldoun & David Baratoux

Université Paul Sabatier Toulouse III
-en cotutelle avec-
Université Cadi Ayyad Marrakech

FICHE PRÉSENTATIVE DE LA THÈSE

Nom et Prénom de l'auteur : AIT MOULAY LARBI El mamoun

Intitulé du travail : Observation et analyse des émissions associées aux chutes des météoroides sur la Lune.

Directeur de Thèse : Zouhair Benkhaldoun , PES, Laboratoire de Physique des Hautes Energies et Astrophysique, FSSM-UCAM.

Directeur de Thèse : David Baratoux, Maitre de Conférences, Observatoire Midi Pyrénées Géosciences Environnement Toulouse, Université Paul Sabatier Toulouse III

Laboratoires et institutions :

- LPHEA, faculté des sciences Semlalia, UCA.
- Observatoire astronomique de l'Oukaïmden, UCA.
- Geosciences Environnement Toulouse, UPS

Cadres de coopération et soutien : Thèse en cotutelle
PHC-Action intégrée (Université Cadi Ayyad-Université Paul Sabatier Toulouse III)

Période de réalisation du travail de thèse : 2012-2016
Mots clés : Météoroïde – Lune – Impact – Flash – Flux – Cratère

Rapporteurs autres que l'encadrant :

CHENNAOUI Hasnaa, PES : Université Hassan II Casablanca, FSAin Chock
MOUSIS Olivier, PES, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille
JABIRI Abdelhadi, PES, Faculté des Sciences Semlalia Marrakech, UCAM

Ce travail a donné lieu aux résultats suivants (communications, publications,…) :
Voir liste des publications à la page iv

Liste des publications

Articles parus dans des revues à comité de lecture :

i) **M. Ait Moulay Larbi,** A. Daassou, D. Baratoux, S. Bouley, Z. Benkhaldoun, M. Lazrek, R. Garcia, F. Colas, "First lunar flashes observed from Morocco (ILIAD Network) : implications for lunar seismology", Earth Moon, and Planets, 2015., DOI 10.1007/s11038-015-9462-1.

ii) A. Daassou, Z. Benkhaldoun, Y. Elazhari, **M. Ait Moulay Larbi**, "An analyticalmodel for the 0.33 - 7.85 micron transmission spectrum of HD189733b : Effect ofstellar spots", IJCA, 2014, vol. 107, no. 10, p. 1-8. DOI : 10.5120/18784-0128

iii) R. Rudawska, A. Daassou, **M. Ait Moulay Larbi**, Z. Benkhaldoun, J. Vaubaillon, F. Colas, D. Baratoux, S. Bouley, "Birth of meteor network in Morocco – Analysis for the 2012 Geminids", WGN, Journal of the International Meteor Organization,2013, vol. 41, no.4, p. 121-128.

Articles publiés dans les proceedings :

i) **M. Ait Moulay Larbi**, Z. Benkhaldoun, D. Baratoux , A. Daassou, S. Bouley., “Lunar impact flashes: Results from 56 hours of video survey data observed by using one telescope”, European Planetary Science Congress 2015, id. EPSC2015-702.

ii) **M. Ait Moulay Larbi,** A. Daassou, D. Baratoux, S. Bouley, Z. Benkhaldoun, M. Lazrek, "First lunar flashes detected from Morocco at AGM observatory of Marrakech", European Planetary Science Congress 2013, held 8-13 September inLondon, UK, id.EPSC2013-333.

iii) D. Baratoux, H. Chennaoui-Aoudjehane, F. Colas,, **M. Ait Moulay Larbi**., S. Bouley, A. Bounhir, A, M.Calvet, S. Chaabout, S, Chevrel, A. Daassou, R. Garcia, A. Habib, A. Jabiri, N. Larouci, P. Pinet, M. Sabil, J. Vaubaillon, "A French-Morrocan Project for the Studies of Impact Processes on the Earth and the Moon", Proceedings of the conference Asteroids, Comets, Meteors 2012,. LPI Contribution No. 1667, id.6038, 2012.

Participation et Communication à des colloques internationaux :

i) **M. Ait Moulay Larbi,** A. Daassou, D. Baratoux, S. Bouley, Z. Benkhaldoun., "Observation of Impact flashes on the Moon in Morocco", 19th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics 2012, held 23 - 28 April in Kyiv, Ukraine. (Poster ET Oral).

ii) **M. Ait Moulay Larbi,** A. Daassou, S. Bouley, D. Baratoux, Z. Benkhaldoun, M. Lazrek, "Birth of the International Lunar Impact Astronomical Detection (ILIAD)network : First

detections in Morocco": American Geophysical Union, Fall Meeting 2013, held 9-13 December in San Francisco-California-USA. abstract P41F 1978. (Poster)

iii) **M. Ait Moulay Larbi,** A. Daassou, S. Bouley, D. Baratoux, Z. Benkhaldoun, M. Lazrek, "First lunar flashes detected from Morocco at AGM observatory ofMarrakech", European Planetary Science Congress 2013, held 8-13 September in London, UK, id.EPSC2013-333. (Poster).

iv) **M. Ait Moulay Larbi,** A. Daassou, D. Baratoux, Z. Benkhaldoun, S. Bouley, M. Lazrek, "Lunar impact flash observations, detection, and analysis : results from 56 hours of video survey. Lunar Impact Workshop, held 2-3 June 2015 in Amsterdam, Netherlands (Noordwijk) ESTEC Center-European Space Agency. (Oral).

v) **M. Ait Moulay Larbi,** A. Daassou, D. Baratoux, Z. Benkhaldoun, S. Bouley, M. Lazrek, "Implications of Lunar impact flash observations to lunar seismology. Lunar Impact Workshop, held 2-3 June 2015 in Amsterdam, Netherlands (Noordwijk) ESTEC Center-European Space Agency. (Oral).

RESUME DE LA THÈSE:

Les météoroïdes, issus de petits corps du système solaire produisent des phénomènes lumineux (flashs d'impact) lorsqu'ils percutent le sol de la Lune. Ces événements lumineux transitoires sont observables depuis le sol en utilisant des télescopes de taille moyenne (typiquement > 200 mm de diamètre) à l'aide des caméras CCD rapides de haute sensibilité. Dans cette thèse, nous décrivons la configuration instrumentale, la procédure d'observation et d'analyse qui a été implémentée à l'Observatoire Universitaire de l'Oukaimden pour l'observation régulière des flashs lunaires. Les premiers impacts lunaires observés et confirmés depuis un observatoire situé en Afrique et dans le monde arabe sont analysés dans ce manuscrit. Nous discutons les caractéristiques de cinq flashs et les paramètres physiques attribués aux impacteurs associés. Nous présentons une première estimation du flux d'impact à l'issue de cette phase de surveillance des impacts lunaires depuis nos observatoires. Nous présentons également le développement et le test d'une stratégie pour déterminer avec précision les coordonnées des impacts observés depuis la Terre. Cette précision de séléno-localisation pourra être utilisée au profit de futures missions sismologiques qui utiliseront les impacts météoritiques pour explorer l'intérieur lunaire.

مــلخــص الــرســـالـــة

النيازك، الصادرة من الأجسام الصغيرة في المنظومة الشمسية تنتج ظواهر ضوئية (ومضات) عندما تتصادم مع سطح القمر هذه الأحداث الضوئية العابرة يمكن التقاطها من الأرض باستخدام تلسكوبات متوسطة الحجم (>200 مم) و كاميرات حساسة سريعة.

في هذه الأطروحة، نقدم المعدات الأساسية المستخدمة، وإجراءات المراقبة والتحليل الذي تم إتباعها في مرصد أوكايمدن لمراقبة منتظمة لسقوط النيازك الصغيرة على القمر والومضات المترتبة عنها. نقوم في هذه الأطروحة بتحليل أول ظواهر قمرية من هدا النوع بتم رصدها من مرصد إفريقي وعربي. نناقش خصائص هذه الومضات الخمسة و الخصائص المادية للأجسام المحدثة لها. من خلال هده المرحلة الأولى لرصد الإصطدامات على سطح القمر نقدم أيضا تقديرا أولي لتدفق هده الأجسام على سطح القمر والكرة الأرضية. نقدم أيضا تطوير واختبار إستراتيجية لتحديد دقيق لإحداثيات الإصطدامات من الأرض. هذه الدقة في تحديد مواقع الإصطدامات يمكن استخدامها لصالح البعثات المستقبلية التي سوف تستخدم الإشارات الزلزالية المترتبة عن الإصطدامات لدراسة التكوين الداخلي للقمر

ABSTRACT OF THE THESIS:

Meteoroids, coming from small bodies of the solar system, produce luminous phenomena (impact flashes) when they strike the lunar surface. These transient light events are observable from the ground using medium-sized telescopes (typically> 200 mm in diameter) by using high-speed CCD cameras. In this thesis, we describe the instrumental configuration, observation and analysis procedure that was implemented at the Oukaimden Observatory for regular observation of lunar flashes. The first lunar impacts observed and confirmed from an observatory located in Africa and the Arab world are analyzed in this manuscript. We discuss the characteristics of five flashes and the physical parameters attributed to the associated impactors. We present an initial estimate of the impact flux from this first phase of monitoring lunar impacts from our observatories. We also present the development and testing of a strategy to accurately determine the coordinates of impacts observed from Earth. This precision of seleno-localization can be used for future seismological missions that will use meteoroid impacts to explore the lunar interior.

Remerciements

C’est au DIEU que devraient s’adresser mes premiers remerciements, pour l’univers merveilleux dont nous faisons partie et que nous avons la chance de vouloir et pouvoir connaitre toujours mieux. Plus proche de nous dans le temps, je voudrais évoquer avec gratitude tous ceux qui, au long des civilisations ont fait avancer la ‘‘Science’’, à pas menus ou par grands bond, pour la mener dans son état exaltant d’aujourd’hui.

Je tiens à remercier sincèrement Zouhair Benkhaldoun, en tant que Directeur de thèse, de m’avoir permis de faire un tout petit pas dans le monde de l’astrophysique. J’exprime ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à mon encadrant David Baratoux pour l'encadrement et l'amabilité avec lesquels il a suivi ce travail. Il a toujours été à mes côtés pour m'encourager dans les moments difficiles et me pousser dans les moments de fertilité. J'exprime ma gratitude à Sylvain Bouley pour son aide dans ce travail et je le remercie de m’avoir accueilli au Laboratoire à IDES- Géosciences Paris Sud. Mes remerciements s’adressent également à mon collègue Ahmed Daassou, pour sa générosité, dont il a su faire preuve malgré ses charges professionnelles, pour l'aide et le temps qu'il a bien voulu consacrer pour réussir les observations.

J'adresse mes sincères remerciements au Professeur Abdelghani CHEHBOUNI, directeur Institut de Recherche et Développement, pour l'intérêt qu'il a manifesté à ce travail et de m'avoir fait l'immense honneur de présider le jury.

Je remercie vivement Madame Hasnaa CHENNAOUI, Professeur de Université Hassan II de Casablanca, pour avoir accepté de juger ce travail en tant que rapporteur et membre de jury.

J'exprime toute ma gratitude à Monsieur Abdelhadi JABIRI, Professeur à l’université Cadi Ayyad Marrakech, pour avoir accepté de juger ce travail en tant que rapporteur et membre de jury.

Je remercie également Monsieur Olivier MOUSIS, Professeur au Laboratoire d’Astrophysique de Marseille (en France), pour le temps qu'il a consacré pour juger ce travail en tant que rapporteur.

Je tiens à faire part de mes remerciements à tous les Professeurs du Laboratoire de Physique des Hautes Energies et Astrophysique, les Pr. M. Oulne, Pr. M. Chabab Pr. A.

Jabiri, Pr. Y. Attaourti, Pr. A. Adahchour, Pr. M. Kacimi, Pr. D. Goujdami.

Merci à mes parents, et avec eux, à tous ceux qui, famille ou amis, m’ont donné le gout de la vie. Je souhaitais adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce travail ainsi qu’à la réussite de cette formidable expérience.

Je ne pouvais finir qu’en remerciant mes collègues et toutes les personnes qui m’ont apporté au cours de ces années, aide et soutien, et m’ont offert la chaleur de leur amitié ou de leur affection, un simple salut de la main serait bien pauvre pour vous exprimer toute ma gratitude.

Nombreuses sont les personnes qui par leurs soutiens et leurs compétences ont été mise à contribution. Qu’elles reçoivent mes plus vifs remerciements.

Remerciements Académiques :

- The Emerging Nations Science Foundation: Pour la subvention de voyage pour participer au congrès 19th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space April 2012, in Kiev, Ukraine.
- Le ministère français des Affaires étrangères au Maroc - Campus France : Pour Subvention de voyage et séjour pour stage de recherche à l'Observatoire de Paris - Observatoire de l’Uranoscope - IDES laboratoire.
- University College London: Pour l’accueil chaleureux et la subvention pour participer au congrès European Planetary Sciences Congress 2013 ; London UK.
- American Geophysical Union: Pour Subvention de voyage pour participer à AGU FALL MEETING 2013; San Francisco, USA.
- European Space Agency - ESTEC center : Pour subvention de voyage et de séjour pour participer au Lunar Impact Workshop (LIWos 2015). Amsterdam Pays-Bas.

Table de matières

Fiche présentative de la thèse iii
Liste des publications iv
Résumé vi
Remerciements vii
Table des matières ix

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralités sur les impacts dans le système solaire

Introduction 11
I. Collisions géantes et évolution catastrophique du système planétaire. 11
II. Les corps impacteurs 20
III. Quelques événements remarquables récents 23
III.1. Le flash lunaire de 1953 23
III.2 Les collisions des fragments de Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter 25
III.3 L'impact des Léonides sur la Lune en 1999 27
III.4 L'évènement de Tcheliabinsk 28
III.5 Flash lunaire de 17 mars 2013 30
III.6 Flash lunaire du 11 septembre 2013 31
IV. Flux d'impact présent dans le système Terre-Lune 33
Références 38

Chapitre II : Généralités sur les flashs d'impacts lunaires

I. Historique des flashs lunaires 45
I.1. Preuves des impacts lunaires 45
I.2. De 1999 … à nos jours 47
II. Intérêt scientifique des flashs lunaires 48
II.1. Flux d'impact 48
II.2. Intérieur lunaire 52
II.3. Identification des nouveaux cratères sur la lune 55
II.4 Atmosphère lunaire 62
III. Paramètres de détection des flashs lunaires 65
III.1 Considérations géométriques 65
III.2 Considérations du signal sur bruit 66
III.3 Efficacité lumineuse 71

Chapitre III : Observation des flashs lunaires observés au Maroc

Introduction 85
I. Observation des impacts lunaires au Maroc 86
I.1. Contexte du projet 86
I.2. Présentation des observatoires 88
I.3. Configuration Instrumentale dédié à l'observation des flashs 90
I.4. Manipulation et acquisition 96
I.5. Identification des événements candidats 98
I.6. Confirmation des flashs d'impacts 100
II. Découvertes des impacts lunaires 102
II.1. Observation 102

II.2. Les premières découvertes 104
II.2.1Analyse préliminaires et paramètres mesurés 106
II.2.1.1.Localisation temporelle 106
II.2.1.2. Localisation spatiale 108
II.2.1.3. Magnitude Lumineuse 110
II.2.2. Interprétation 113
II.3 Le recueil de détections 115
II.4. Paramètres déduits 119
II.4.1.Les incertitudes 121
III. Implication sur le taux d'impact dans le Système Terre-Lune 124
III.1 Préliminaires 124
III.2 Taux déduits de nos observations 126
IV. Implications séismologiques et intérieur lunaire 134
IV.1.Localisation des impacts lunaires 134
IV.2.Application de la méthode 136
IV.3. Implications pour la sismologie lunaire 142
V. Utilité d'un réseau international 143
Références 146

Chapitre IV : Observation des flashs lunaires dans l'infrarouge
Introduction 151
I. Instrumentation et Observation 151
I.1. Spectre infrarouge et bandes d'intérêt 151
I.2 Observation 154
II. Résultats et discussion 157
III. Conclusion 163
Références 164

Conclusion générale et Perspective 166

ANNEXE A 173
ANNEXE B 174
ANNEXE C 176
Listes des figures 177
Listes des tableaux 180

Introduction générale

Nous nous intéressons dans cette thèse aux impacts dans le système solaire. Un événement d'impact est une collision à grande vitesse entre les objets du système solaire. Les impacts produisent des effets physiques mesurables (cratère, émission lumineuse, propagation d'une onde de choc, et onde élastique). Les collisions sont au cœur de la formation planétaire (accrétion), et le transfert d'énergie et de matière associée à ces collisions contribue à l'évolution planétaire.

Les surfaces des planètes et de leurs satellites sont fréquemment affectées par des collisions avec des objets de petites dimensions. Ils peuvent être considérés comme des énormes détecteurs de petits corps (astéroïdes, comètes et météoroïdes). Le Lune, notre satellite naturel, représente un détecteur naturel pour observer ces collisions depuis le sol terrestre. L'observation et l'analyse scientifique de ce phénomène est l'objet de cette thèse.

Dans le cas de notre satellite, la Lune, et en absence d'atmosphère, les chutes des météoroïdes se produisent avec des vitesses comprises entre 10 à 71 km/s. Après le choc, une fraction de l'ordre du millième de l'énergie cinétique d'impact est convertie en rayonnement thermique, produisant un phénomène lumineux transitoire et de courte durée (typiquement inférieure à 1 s, pour des objets de quelques centaines de grammes). Ce rayonnement lumineux (appelé flash lunaire) est associé à l'élévation de température et la transformation des matériaux lunaires (vaporisation) et éventuellement ceux du projectile. La nature exacte de l'émission lumineuse reste débattue, mais on considère qu'un plume de plasma se forme à la suite de l'impact, celui-ci est d'abord opaque au rayonnement, puis devient transparent lors de son expansion et de son refroidissement. Le plume peut alors se condenser, et l'émission lumineuse qui se poursuit peut-être le résultat d'une émission de type corps noir de gouttelettes en suspension dans une phase gazeuse. Ces gouttelettes pourront alors se solidifier et continuer de rayonner à des plus basses énergies (infra-rouge) jusqu'à leur refroidissement complet (Melosh et al. 1993, Clark & Melosh. 1996, Artemieva et al. 2001, Yanagisawa et al. 2006, Bouley et al. 2012). Des télescopes de taille moyenne (0.2 à 0.5 m de diamètre) et des caméras CCD rapides sont généralement suffisants pour observer ces phénomènes, avec une fréquence de plusieurs évènements par an. Il est donc possible d'envisager une surveillance de ce phénomène sur plusieurs années pour établir le taux de chute de petits corps sur la Lune, et par conséquence de mieux contraindre le flux d'impact dans le système Terre-Lune.

Contexte scientifique de l'observation des flashs lunaires – La connaissance du taux d'impact actuel est cruciale pour évaluer le risque encouru par l'humanité et la vie terrestre. Notre atmosphère terrestre constitue une protection contre les météoroïdes en ralentissent leurs vitesses significativement. Pourtant, les corps ayant des tailles supérieures à quelques mètres ne brûlent pas complètement dans l'atmosphère et peuvent parfois arriver jusqu'au sol avec une vitesse de collision considérable (plusieurs km/s). Parfois, même si le corps n'est pas assez grand pour provoquer des effets dangereux directes sur la surface, il peut exploser dans l'atmosphère avec une énergie comparable ou bien supérieure à celle d'une bombe atomique en générant une forte onde de choc qui se propage dans l'atmosphère. Ce type d'évènement peut provoquer des dégâts considérables, comme dans le cas d'événement de Tunguska en Sibérie en 1908 (par exemple Vasilyev, 1998), Tcheliabinsk en 2013 (Brown et al, 2013a; Popova et al, 2013). Les grandes météoroïdes (10m<diamètre<50m) sont capables de causer des dégâts considérables s'ils pénètrent l'atmosphère terrestre au-dessus des zones terrestres peuplées, et peuvent même représenter une menace à l'échelle d'un pays. Or, le flux d'impacteurs dans le voisinage terrestre est très mal connu si nous considérons les météoroïdes dans cette gamme de taille.

Notre atmosphère peut être aussi considérée aussi comme un détecteur efficace de la présence de petits corps dans le voisinage de la Terre. Les météoroïdes, bolides dans l'atmosphère, leurs interactions sont principalement observables soit par : les caméras à grands champs de vision et les caméras All-Sky qui observent les émissions lumineuses, ou par les détecteurs des infrasons mis en place sur des satellites artificiels militaires ou les récepteurs des ondes acoustiques basés au sol. Ces deux techniques ont contribué largement à l'estimation du taux d'impact actuel de petits astéroïdes (~10 m) inaccessibles par observation directe. Pourtant, la surveillance par les deux systèmes est limitée à des zones atmosphériques locales.

Des zones de collecte très grandes sont nécessaires afin de fournir des statistiques supplémentaires pour les calculs de flux présent de grands météoroïdes (où petits astéroïdes). Notre satellite naturel 'la Lune' peut être utilisé comme détecteur de météoroïdes dans le voisinage terrestre. La surveillance des chutes des petits corps sur la Lune depuis le sol offre un avantage statistique en comparaison avec l'observation des interactions atmosphériques depuis le sol (météores) : la zone collectrice lunaire qui peut être couverte par un seul télescope (2 à 10 millions km^2) par rapport à la zone de collecte atmosphérique contrôlée par une caméra des météores (3.000 à 10.000 km^2), bien que cette surface puisse être

considérablement augmentée par un réseau de caméras. La zone collectrice offerte par notre satellite permet d'observer un nombre très important de météoroïdes si les observations sont effectuées régulièrement et à long terme. La surveillance de la surface lunaire est donc motivée par la quantification du taux d'impact actuel sur la Lune, pour affiner le taux d'impact terrestre. La technique d'observation des flashs lunaires peut être utilisée pour déterminer un flux de météoroïdes dans une certaine gamme de masse (30 g à quelques dizaines de kilogrammes). Cette gamme est justement mal connue et mal échantillonnée par observation depuis la Terre avec les techniques classiques d'observation des bolides dans notre atmosphère (Brown et al. 2002 ; 2013). La mesure du flux d'impact actuel par cette technique peut aussi aider à caractériser le rôle des cratères primaires et des cratères secondaires dans la courbe de production de cratères d'impact, pour répondre aux récentes critiques qui reçu ces méthodes populaires de comptage des cratères utilisées dans la datation des surfaces planétaires de notre système solaire.

Autres motivations - Les impacts météoritiques sur la Lune ont été détectés pour la première fois sismiquement entre 1969 et 1977 par les sismogrammes installés par les missions Apollo (Nakamura et al. 1981, Oberst & Nakamura. 1987a ; 1987b ; 1991). Un premier résultat révélé par ces expériences est que le bruit sismique sur la Lune est très faible par rapport au celui sur Terre (la majorité de l'activité sismique lunaire est provoquée par les forces de marée engendrées par le champ de gravité terrestre). Ce bruit sismique faible rend la détection sismique des impacts météoritiques (ou artificiels) très efficace. Les impacts naturels (météoritiques) ont représenté une part importante du catalogue d'événements sismiques détectés par les sismogrammes à l'époque (Lognonné et al. 2009). Malheureusement, ces impacts n'ont pas été localisés (spatialement et temporellement) avec précision suffisante pour faire une bonne inversion du temps de propagation des ondes en termes de structure de la croûte lunaire. Ceci a empêché de sonder l'intérieur de la Lune avec une précision équivalente à celle atteinte sur Terre. La structure lunaire a été également sondée essentiellement grâce à deux impacts artificiels provoqués par l'étage supérieur (3ème) de la fusée Saturn V (SIV-B) et l'étage d'ascension du LUNAR MODULE 45 (LM). La majorité de nos connaissances sur la structure lunaire interne est basée sur ces deux impacts artificiels. Malgré les améliorations technologiques des sismomètres, les futures missions consacrées à l'exploration géophysique de la Lune seront confrontées à des difficultés similaires. Aujourd'hui, les impacts météoritiques sur la Lune sont observables depuis le sol terrestre via leurs émissions thermiques. Ces observations ouvrent la possibilité de fournir

l’instant et la position de la source sismique de manière indépendante et précise au profit de futurs réseaux séismiques lunaires (ILN-NASA: 2018 / SELENE II-JAXA : 2017 / Lunette-NASA: 2018), qui utiliseront les impacts naturels comme sources sismiques pour contraindre la structure interne lunaire. La surveillance des impacts simultanément à partir du sol représentera probablement un segment sol indispensable de ce type de mission, en particulier si le nombre de sismomètres déployés sur la Lune est faible. Cette détermination indépendante qui va conduire à une réduction du nombre d’inconnu est un facteur décisif pour l’inversion des sismogrammes, et va permettre éventuellement d’améliorer notre connaissance sur la structure de la croûte lunaire, chose qui fait l’une des principales motivations de ce travail. De nouveaux concepts de l’exploration lunaire inclus presque systématiquement cette révolution en sismologie lunaire qui impliquera des stations terrestres ou spatiales de surveillance des flashs lunaires (Mimoun et al. 2012, Le Feuvre & Wieczorek, 2011).

Grâce à la diffusion de données des caméras de haute résolution à bord des orbiteurs lunaires (LROC ‘Lunar Reconnaissance Orbiter’ ou d’autres futurs caméras), nous avons accès à des données d’imagerie de plus en plus précises permettant d’observer la surface lunaire à 1.5-3 m de résolution spatiale. Il est maintenant possible d'identifier de nouvelles structures sur la surface de la Lune, en particulier les nouveaux cratères (Daubar et al. 2011). Un des pans de la recherche dans ce domaine est de tester la fiabilité de la chronologie pour les cratères de diamètres inférieurs à 1 km (diamètre minimum qui a servi de calibration à la chronologie lunaire). A partir des images basées au sol des flashs lunaire nous pouvons fournir un catalogue de nouveaux cratères et déterminer la position des impacts avec une précision inférieure à 5 km, ce positionnement va faciliter la recherche de nouveaux cratères associés aux impacts.

D’autres motivations de la surveillance des flashs lunaires sont liées à la caractérisation de la composition de l'atmosphère lunaire, en étudiant les processus qui contrôlent sa distribution et sa variabilité, y compris les sources, la présence des poussières et les interactions de surface. La faible gravité sur le satellite ne peut pas conserver les espèces gazeuses pendant une longue période et un flux continu est nécessaire pour maintenir l’existence de cette atmosphère. Il est maintenant clair que les changements transitoires de l’atmosphère lunaire mince sont principalement dus aux chutes des météoroïdes (Benna et al. 2014 ; Colaprete et al. 2014 ; Stubbs et al. 2014).

Contexte de l'observation des flash-lunaire à l'Observatoire de l'Oukaimden - La thématique des flashs d'impacts lunaires fait partie d'un projet de collaboration Franco-Marocain né en 2011, qui à aboutit au financement d'une action intégrée de 4 ans « Partenariat Hubert Curien - Volubilis », conçu pour fédérer une équipe de géologue et d'astronome autour de la question du flux d'impact dans le système Terre-Lune (Baratoux et al. 2012). La motivation scientifique des partenaires de ce projet est de décrire et comprendre la nature et le flux de matière extra-terrestre et les conséquences de ce flux d'objets sur l'évolution de notre planète. Le projet aborde l'ensemble des phénomènes astronomiques et géologiques liés au flux d'impacts météoritiques, et réunit une équipe internationale pluridisciplinaire, essentiellement composée de chercheurs français et marocains. Ce programme a en effet trois axes de recherche, l'un concernant l'observation des météores et l'analyse de météorites, le second sur la recherche de cratères d'impact au Maroc, et enfin, l'axe abordé dans cette thèse qui s'intéresse à l'observation des chutes de météoroïdes sur la Lune. L'Observatoire de l'Oukaimeden élargit ainsi son domaine de compétence sur la scène internationale, alors qu'il a déjà acquis une solide réputation dans le domaine des petits corps avec la détection récente de quatre comètes et quatre astéroïdes dans la cadre du projet MOSS (Benkhaldoun et al. 2012, http://moss-observatory.org/).

L'un des premiers objectifs au début de ce projet (flashs lunaires) a été de former aux techniques d'observation des impacts sur la Lune, de réussir l'observation de premiers flashs d'impacts lunaires, et l'élaboration d'un système opérationnel dans nos observatoires pour mener des campagnes des surveillances régulières de la surface lunaire. L'objectif des observations régulières est la quantification du taux d'impact actuel sur la Lune, ce qui aidera à préciser également le flux d'impact sur Terre et de déterminer de manière générale la distribution et la fréquence de petits astéroïdes dans l'environnement Terre-Lune, avec des implications pour l'utilisation de l'espace et de l'orbite terrestre (risques d'impact pour les satellites). Le projet s'inscrit également dans le contexte international de préparation aux futures missions sismologiques lunaires qui utiliseront les impacts météoritiques comme sources sismiques pour mieux contraindre la structure interne lunaire. L'ensemble de ces objectifs ont été focalisé dans le cadre de ce projet de thèse.

Présentation du mémoire - Le premier chapitre de cette thèse aborde brièvement l'histoire des collisions dans notre système solaire, afin de montrer que l'étude de ces impacts contribue à notre compréhension de l'évolution planétaire. Nous présenterons les caractéristiques principales des impacteurs, leur origine et leur diversité et nous illustrons le

processus d'impact par quelques collisions remarquables et distinctes. Nous discutons enfin le taux d'impact dans l'environnement terrestre afin d'entamer la problématique de la recherche sur la surveillance des impacts lunaires depuis le sol terrestre.

Dans le deuxième chapitre, et en premier lieu nous présenterons une brève histoire de la détection des flashs lunaires. Nous présenterons ensuite, l'intérêt scientifique des observations des impacts sur la Lune: quantification du flux d'impacts présent sur la surface lunaire. Nous présenterons aussi l'importance de ces observations à travers les différentes implications intervenant dans l'exploration lunaire, à savoir, la sismologie lunaire, l'étude de l'atmosphère lunaire, et la découverte des nouveaux cratères. Finalement, nous mettrons l'accent sur les contraintes observationnelles préalables (e.g., visibilité de ces événements lumineux sur la partie sombre du disque lunaire, observations autour de la nouvelle lune, après le coucher du soleil, ou avant son lever).

Dans le cadre du troisième chapitre nous décrivons les premiers impacts lunaires observés et confirmés depuis nos observatoires. Nous décrivons également la procédure suivie pour réussir l'observation, l'interprétation et l'analyse de ces découvertes. Nous présentons une première estimation du flux d'impact à l'issue de cette première phase de surveillance des impacts lunaires depuis nos observatoires. Nous décrivons ensuite le développement et le test d'une stratégie pour déterminer avec précision les coordonnées des impacts observés. Finalement, nous expliquons l'importance de développer un réseau d'observatoires autour du globe. Une telle collaboration permettrait de mieux valoriser des futures explorations lunaires ainsi que l'expertise acquise dans l'observation des flashs au Maroc.

En quatrième chapitre, nous récapitulons le raisonnement qui justifie notre choix d'explorer la possibilité d'effectuer des observations dans l'infrarouge proche. Nous décrivons les résultats préliminaires des efforts déployés dans le but de détecter les flashs lunaires en Infrarouge. Nous n'avons pas pu observer de flashs dans l'infra-rouge jusqu'à ce jour. Les procédures suivies et les conclusions qu'il faut tirer de cet exercice expérimental sont présentées.

L'observatoire de l'Oukaimeden se place à la suite de cette thèse comme leader Africain pour l'observation des impacts lunaires et pourra jouer un rôle important dans un futur réseau international d'observatoires et souhaite participer à terme à la valorisation scientifique de données sismologiques lunaires et à la caractérisation du flux d'impacts actuel dans le système Terre-Lune.

Références

Artemieva, N.A. Kosarev, I.B. Nemtchinov, I.V. Trubetskaya, I.A. Shuvalov, V.V. (2001). Light flashes caused by Leonid meteoroid impacts on the lunar surface. Sol. Syst. Res. 35, 177–180 .

Baratoux, D.; Chennaoui-Aoudjehane, H.; Colas, F.; Benkhaldoun, Z.; Jambon, A.; Leroy, A.; Lognonné, P.; Azagrouze, O.; Ait Moulay Larbi, M. et al. A French-Morrocon Project for the Studies of Impact Processes on the Earth and the Moon. Asteroids, Comets, Meteors 2012. LPI Contribution No. 1667, id.6038

Benkhaldoun, Z.; Rinner, C.; Ory, M.; Daassou, A.; Colas, F. The Morocco Oukaimeden Sky Survey, the MOSS Telescope. Asteroids, Comets, Meteors 2012, LPI Contribution No. 1667, id.6182.

Benna et al. (2014). Fall AGU metting, Abstarct # P21F-02.

Bouley S., Baratoux D., Vaubaillon J., Mocquet A., Le Feuvre M., Colas F., Benkhaldoun Z., Daassou A., Sabil M., and Lognonné P. 2012. Power and duration of impact flashes on the Moon: Implication for the cause of radiation. Icarus 218: 115-124.

Brown, P., Spalding, R.E., ReVelle, D.O., Tagliaferri, E., Worden, S.P.: The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth. Nature 420, 294-296 (2002).

Brown P. G. and al, (2013a) A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. Nature 503, 238-241.

Clark, R. Melosh, H. 1996. The detectability of lunar impacts in the near infrared.Master's thesis, The University of Arizona, Department of Planetary Sciences,.

Colaprete et al. (2014). Fall AGU Meeting, Abstarct # P21F-04.

Daubar, I.J.,McEwen, A.S.,Burne, S.,Dundas, C.M.,Keske, A.L.,Amaya, G.L.,Kennedy, M., Robinson, M.S.,2011.New Crater son Mars and the Moon.In: Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference XLII.pp.2232–2233.

Le Feuvre, M., and M. A. Wieczorek (2011), Nonuniform cratering of the Moon and a revised crater chronology of the inner solar system, Icarus, 214, 1–20, doi:10.1016/j.icarus.2011.03.010.

Lognonné, P., Le Feuvre, M., Johnson, C.L., Weber, R.C., 2009. Moon meteoritic seismic hum: Steady state prediction. J. Geophys. Res. (Planets) 114 (E13), E12,003, doi:10.1029/2008JE003294.

Melosh, H.J., Artemieva, N.A., Golub, A.P., *et al.* 1993, Remote Visual Detection of Impacts on the Lunar Surface, *Abstr. Lunar Planet. Sci. Conf. XXIV*, pp. 975–976.

Mimoun, D, Wieczorek, M.A, Alkalai, L., Banerdt, W.B., Baratoux, D., Bougeret, J.L., Bouley, et al. :Farside explorer: unique science from a mission to the farside of the moon. Experimental Astronomy 33, 529-585 (2012).

Nakamura, Y., G. V. Latham, H. J. Dorman, and J. E. Harris (1981), Passive seismic experiment long period event catalog, Tech. Rep. 118, Inst. for Geophys, Univ. of Tex, Austin.

Oberst, J., and Y. Nakamura (1987a), Lunar seismic impact clusters: Evidence for the presence of ‘‘meteorite streams’’, Lunar Planet. Sci., XVIII, Abstract 736.

Oberst, J., and Y. Nakamura (1987b), Distinct meteoroid families identified on the lunar seismograms, J. Geophys. Res., 92, 769–773.

Oberst, J., and Y. Nakamura (1991), A search for clustering among the meteoroid impacts detected by the Apollo lunar seismic network, Icarus, 91, 315–325.

Popova O. P. et al, (2013) Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. Science 342, 1069-1073.

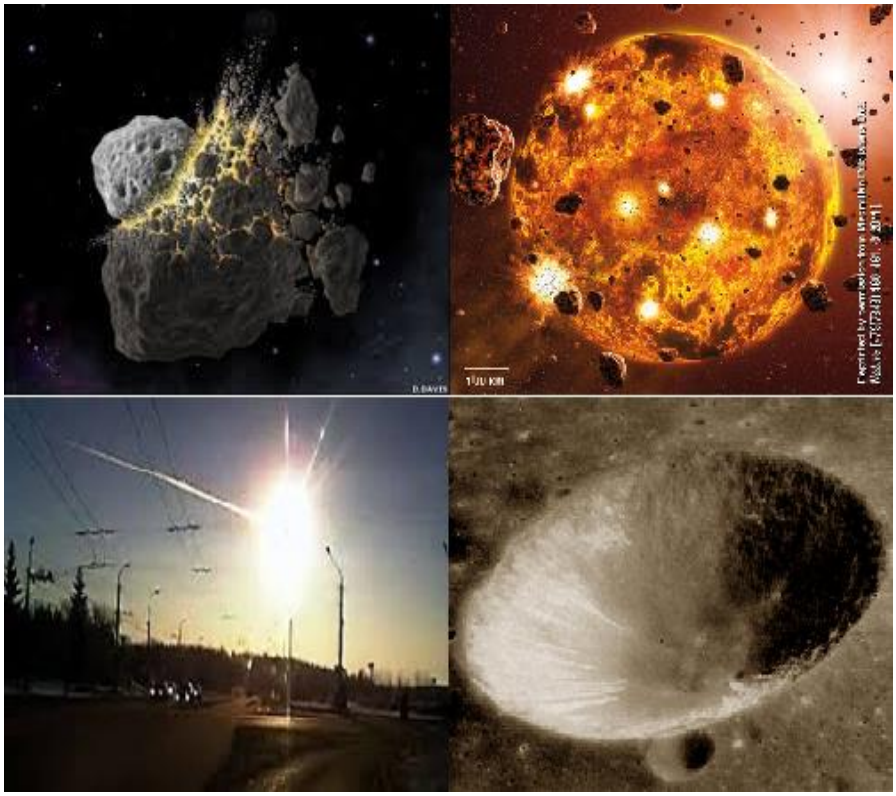
Stubbs, T. J.; Glenar, D. A.; Wang, Y.; Sarantos, M.; Hermalyn, B.; Colaprete, A.; Wooden, D. H.; Benna, M.; Elphic, R. C. (2014), Influence of Meteoroid Streams on the Lunar Environment: Results from LADEE. American Geophysical Union, Fall Meeting, abstract #P23C-4003

Vasilyev N. V. (1998) The Tunguska Meteorite problem today. Planetary and Space Science,46, 129-150.

Yanagisawa, M. Ohnishi, K. Takamura, Y. Masuda, H. Sakai, Y.Ida, M. Adachi, M. Ishida, M. (2006), The first confirmed Perseid lunar impact flash. Icarus 182, 489–495. doi:10.1016/j.icarus.2006.01.004.

CHAPITRE I

Généralités sur les impacts dans le système solaire



Contenu

Introduction 11
I. Collisions géantes et évolution catastrophique du système planétaire. 11
II. Les corps impacteurs 20
III. Quelques événements remarquables récents 23
IV. Flux d'impact présent dans le système Terre-Lune 33
Références 38

Introduction

Les collisions entre objets de notre système solaire sont fréquentes et ont des conséquences sur l'évolution physique (thermique) et chimique des astéroïdes, des planètes et de leur(s) satellite(s). Plusieurs collisions géantes semblent avoir joué un rôle déterminant dans l'évolution des planètes telluriques. L'étude de ces impacts contribue à notre compréhension de l'histoire de notre système solaire, et de l'évolution planétaire depuis leur accrétion jusqu'à nos jours. L'érosion et la tectonique des plaques ont écarté la quasi-totalité de l'enregistrement de la Terre primitive. La nature de la Lune lui a permis d'enregistrer 4,5 milliards d'années (Ga) de l'histoire du système solaire à travers les impacts qu'elle a supporté tout au long de son évolution, par conséquence l'exploration lunaire est un élément clé en science planétaire. Notre satellite naturel est le corps planétaire le plus proche et le plus accessible à partir duquel on peut lire cette histoire et déchiffrer les histoires des autres corps.

Dans ce chapitre, nous abordons l'histoire des collisions dans notre système planétaire, en illustrant comment celles-ci ont contribué à l'évolution de ce système. Nous montrons dans une première section que les cratères d'impacts représentent un objet géologique majeur et commun à toutes les surfaces planétaires et que certaines collisions géantes ont pu influencer de manière catastrophique l'évolution planétaire. Nous présenterons ensuite les caractéristiques principales des impacteurs, leur origine et leur diversité (section 2). Nous illustrerons également le processus d'impact par quelques collisions remarquables (section 3). Je discuterais enfin le taux d'impact dans l'environnement terrestre afin d'entamer la problématique de ma recherche sur la surveillance des impacts lunaires depuis le sol terrestre (section 4).

I. Collisions géantes et évolution catastrophique du système planétaire.

Des collisions ont lieu à toutes les échelles dans le système solaire, mais des collisions géantes, impliquant des objets de plusieurs centaines ou milliers de kilomètres de diamètre ont eu des conséquences déterminantes dans l'évolution de certain corps. Par exemple, il existe une théorie selon laquelle la Lune est issue d'un impact géant. Il existe en fait quatre théories concurrentes pour expliquer la formation de notre satellite naturel: la théorie de la fission, la théorie de la capture, la théorie de l'accrétion, et la théorie d'impact géant. Actuellement, cette dernière hypothèse de l'impact géant est la plus favorisée et la plus soutenue pour expliquer la formation de la Lune (Hartmann et al. 1986). Selon cette théorie, un planétoïde de la taille de

Mars (nommée Théia) a terriblement heurté la Terre primitive encore en fusion, en éjectant une grande partie du manteau terrestre, alors qu'une grande partie du noyau de l'impacteur (Théia) a fusionné avec le noyau de la Terre, ce qui explique la densité élevée du noyau terrestre. La masse qui a été éjectée dans l'espace est alors composée de certaines parties des manteaux de la Terre et de l'impacteur et a formée un anneau autour de la Terre, qui a finalement accrété pour former un satellite rocheux de densité relativement faible mais de composition similaire de la Terre, ce qui est appuyée par l'analyse chimique des données Apollo (Clayton 1993). Au début, la Lune s'est formée très proche de la Terre, mais les interactions de marée entre les deux corps ont entraîné la Lune de migrer lentement vers l'extérieur pour occuper son orbite actuelle. Chaque objet du système solaire possède des compositions isotopiques propres, dans le cas de la Lune, les compositions isotopiques trouvées par analyse des échantillons lunaires sont identiques à ceux qui existent sur Terre. Plus particulièrement, le rapport isotopique de l'oxygène est exactement le même que sur Terre, ce qui favorise le scénario violant de la naissance de la Lune. Néanmoins, les modélisations du scénario de l'impact géant ne produisent pas une lune avec les mêmes rapports isotopiques comme son primaire (Terre), la similarité isotopique de l'oxygène entre la Terre et la Lune reste une contrainte majeure devant cette théorie (Melosh 2014). Les deux scénarios les plus réussies actuellement de Cuk & Stewart (2012) et Canup (2012) utilisent des tableaux très développés de nombreuses simulations, les deux simulations produisent des lunes similaires à notre satellite naturel, mais la similarité isotopique disparaît, et aucune des deux modélisations ne produit une lune avec un rapport isotopique d'oxygène similaire à son primaire.

Les impacteurs (planétoïdes et astéroïdes) ont contribué à façonner les autres surfaces planétaires et dicté les dernières apparitions de la plupart des satellites dans le système solaire et pas seulement notre satellite naturel, la Lune. Leurs signatures (Les cratères d'impacts) sont largement répandus : de Mercure à Triton, et peuvent être trouvées sur presque tous les objets du système solaire. Les impacts géants sont considérés comme à l'origine de certaines caractéristiques de premier ordre de plusieurs planètes. Comme nous le verrons par la suite, il est supposé qu'une époque de collisions violentes a été produite au cours des premières 700 millions années de notre système planétaire (il y a 4,5 à 3,8 Ga). Les datations isotopiques lunaires indiquent qu'il y avait une période de grand bombardement tardif concentrée autour de 3,9 Ga et il est possible que la plupart de ces collisions géantes aient été produites principalement pendant cette période de bombardement qui a durée moins de 300 millions

d'années. Les modèles d'histoire de bombardements dans le système solaire montrent qu'il y avait une modification des orbites des planètes géantes 'Saturne et de Jupiter', les changements gravitationnels ont entrainé de grandes perturbations au niveau de la ceinture des astéroïdes en éjectant des corps immenses vers la zone interne du système solaire. Pendant une longe période, ces corps ont croisés Mercure, Venus, la Terre et Mars et leurs lunes, donnant lieu à des collisions cataclysmiques qui ont contribué à façonner ces planètes, modifier leurs compositions et même leurs positionnements.

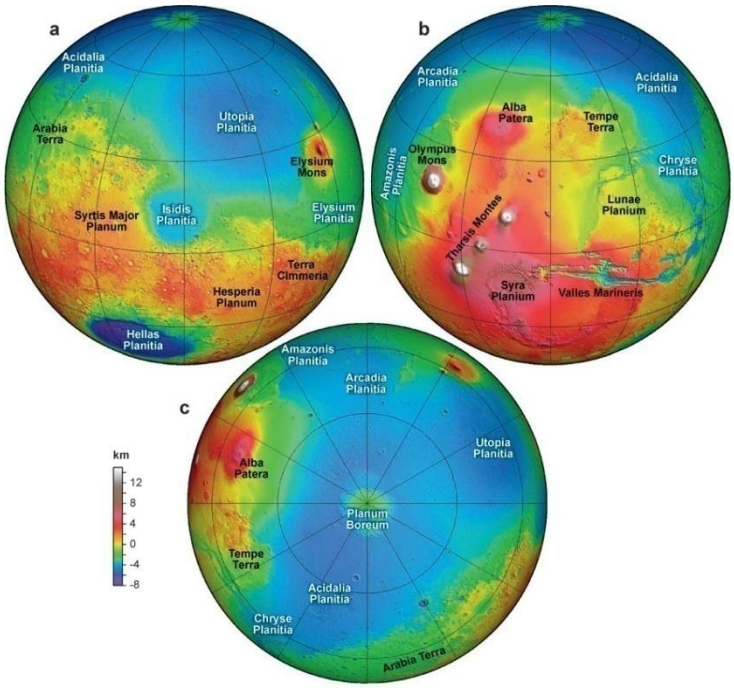


Figure I.1 : Les cartes topographiques de Mars. (A) L'hémisphère oriental centré à 20°N, 90°E; (B) l'hémisphère occidental centré à 20°N, 270°E; et (C) l'hémisphère nord centrée sur 90°N. Les cartes topographiques ont été dérivées de MOLA (Smith et al. 2001). La dichotomie de la croûte Martienne est exprimée par le changement d'élévation entre les hauts plateaux de l'hémisphère sud et les plaines de l'hémisphère nord (surface bleu) (Watters et al. 2007).

A titre d'exemple, Mars à deux faces distinctes (Nord et Sud), les premiers images prises par les sondes qui ont été mise en orbite autour de Mars ont révélé une curieuse division de la surface de la planète (Carr 1981), appelée la dichotomie hémisphérique de Mars. Une différence spectaculaire d'altitude, d'épaisseur de la croûte et de densité du cratère entre les hauts plateaux du sud et les plaines du nord (surfaces de faible altitude couvrent 42% de la surface totale de la planète) (Zuber et al. 2001 ; Neumann. et al. 2008). L'analyse des données et les simulations numériques suggèrent que la dichotomie a été formée au début de l'évolution géologique de Mars, dans le système solaire primitif (Wilhelms & Squyres 1984; Marinova et al. 2008). La théorie la plus convainquante c'est qu'un planétoïde a percuté Mars

dans une collision cataclysmique en éjectant des poussières et débris autour de la planète (Wilhelms & Squyres 1984), ce qui a donné lieu au plus grand cratère du système solaire. Le problème majeur rencontré par la théorie de l'impact géant est la forme de ce cratère, en effet la partie nord de faible altitude est en forme de haricot plutôt que la forme circulaire ou elliptique qu'on trouve habituellement dans les grands cratères du système solaire (figure I.1). Récemment, des nouvelles images plus nettes ont été prises autour de Mars, et à l'aide de relevés topographiques et gravitationnels on a pu voir sous les flots de lave où se trouvent les plus grands volcans du système solaire et qui cachent une partie des frontières du cratère. En retirant les effets de l'activité volcanique, on a pu distinguer la forme réelle de ce cratère, en découvrant que le contour de la zone avait en réalité une forme d'ellipse régulière (voir figure I.2) (Andrews-Hanna 2008). Cette découverte a fortement favorisé la théorie de l'impact géant, car le seul processus connu capable d'engendrer une telle dépression énorme est un impact géant. Les simulations numériques indiquent que l'impacteur avait une vitesse de 6 à 10 km/s et devait mesurer entre 1600 à 2700 km de diamètre (Marinova et al. 2008).

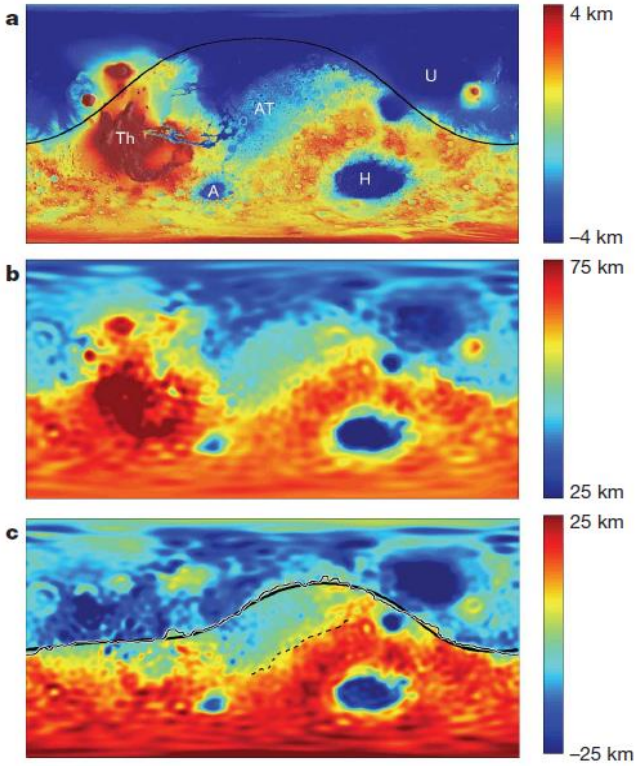


Figure I.2 : La topographie et la structure de la croûte de Mars. (a) : Topographie (Smith et al. 2011), (b) épaisseur de la croûte (Neumann. et al. 2008). (c) Modélisation de la perturbation d'épaisseur de la croûte, montrant la poursuite de la limite de dichotomie sous Tharsis. La limite de dichotomie observée est comparée au meilleur ajustement à une ellipse (ligne en gras).

Les grands impacts sont aussi considérés comme responsables de la rotation rétrograde de Vénus, la forte teneur en métal dans Mercure serait liée à l'érosion d'une grande partie du son manteau silicaté par un impact géant après sa différentiation (Benz et al. 1988). Plus loin dans le système solaire, on trouve notamment, les anneaux de Saturne, et l'inclinaison axiale extrême d'Uranus avec un moment angulaire communiqué par un impact géant à la fin de la phase d'accrétion, et bien d'autres signatures. Les collisions géantes sont aussi impliquées dans l'histoire de l'évolution de la vie sur Terre. En effet, vers la phase finale de l'accrétion et juste après la phase de grand bombardement tardif et la stabilisation relative des planètes sur leur orbites, les premières formes de vie sont apparues sur Terre il y a 3,5 à 3,8 milliards d'années. Ce sont les impacteurs qui auraient délivrés en abondance la matière organique riche en carbone ainsi que l'eau sur Terre, ils ont amenés des changements majeurs à la biosphère terrestre, en terme d'évolution de l'hydrosphère, ainsi que de la lithosphère. L'hypothèse d'un impact cataclysmique est aussi le seul phénomène susceptible d'expliquer les extinctions de masse à la limite Crétacé/Tertiaire. La plupart des paléontologistes s'accordent maintenant sur le fait que l'impact d'un astéroïde (près de 10 km de diamètre) sur les côtes du Mexique est le facteur principal qui a bouleversé le climat terrestre avant la disparition soudaine des dinosaures il y a 65 Ma (Alvarez et al. 1980, Renne et al. 2015).

Les cratères des surfaces planétaires et satellitaires sont les caractéristiques géologiques les plus dominantes dans la plupart de ces corps célestes (planètes, lunes et astéroïdes). Ce processus géologique important a eu lieu tout au long de la vie de notre système solaire, et il est toujours actif et animé (avec moins d'intensité) par les petits corps du système solaire. La taille et la forme des cratères et la quantité de matériaux excavés dépend des facteurs tels que la vitesse la masse et la densité du corps impacteur, ainsi que la géologie de la cible et la gravité à sa surface. Ces structures d'impact varient en taille de 0,01 micron, enregistrée sous forme de micro-cratères dans les échantillons lunaires, aux bassins multi-anneaux de plus de 1000 km de diamètre (voir figure I.3). Les plus grands cratères d'impact ont été formés quand le système planétaire était très rempli de débris laissés par sa formation. Le bassin Caloris sur Mercure, Argyre et Hellas sur Mars, Pôle Sud-Aitken sur la Lune et Valhalla sur Callisto sont des exemples de très grands bassins aux régions intérieures et extérieures du système planétaire qui montrent que le bombardement à cette échelle était présent partout dans tout le système solaire (voir figure I.4). Sur la Lune, plus de 45 bassins avec des diamètres supérieurs à 300 km sont certainement reconnus (Neumann et al. 2015).

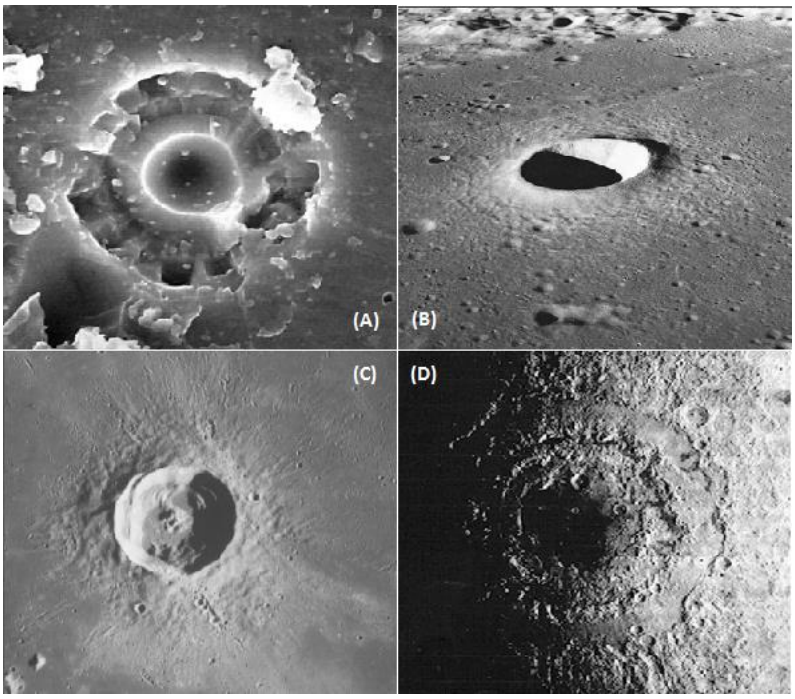


Figure I.3 : Cratères d'impact sur un corps sans atmosphère comme la Lune. Cette illustration montre: (A) un cratère de 10 microns de diamètre; (B) un cratère simple appelé Moltke, 1 kilomètre diamètre; (C) un cratère complexe de 28 km appelé Euler; (D) un bassin multi-anneau de d'impact de 970 km de diamètre appelé Mare Orientale.

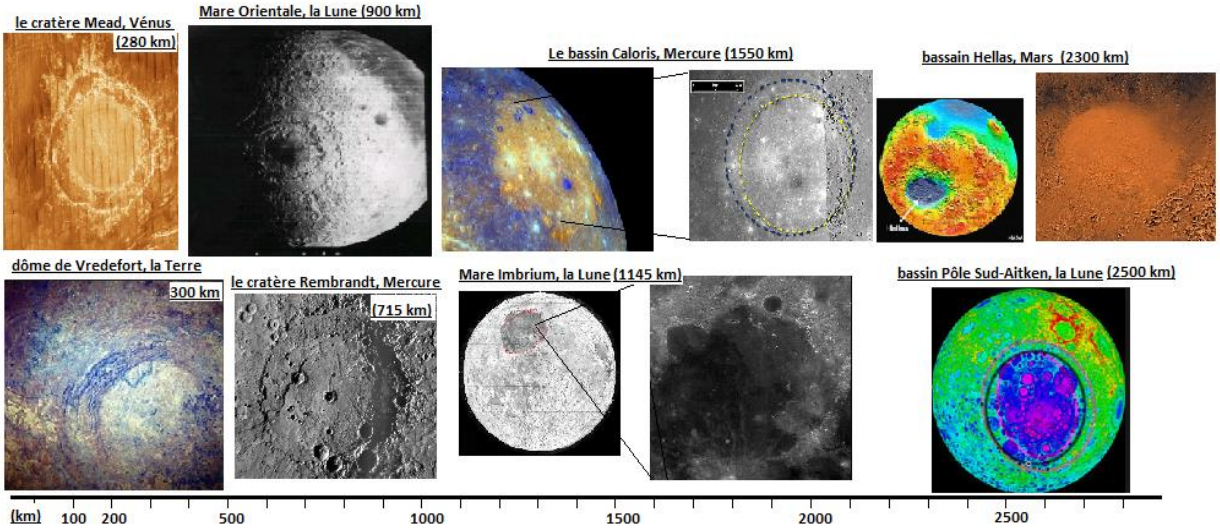


Figure I.4 : Images de certains grands cratères dans le système solaire interne.

Sur la surface de la Terre, plus de 188 cratères d'impacts ont été identifiés jusqu'à aujourd'hui (30-09-16) (EID Earth Impact database). Ces cratères ne représentent qu'une petite proportion des événements d'impacts qui ont affecté la Terre. La plupart des cratères d'impacts sont détruits par la tectonique des plaques, l'érosion et autres processus géologiques, ce qui n'est pas le cas du fameux cratère en Arizona. Les âges précis des cratères terrestres ne

sont connus que pour environ un tiers de ces structures. Seulement cinq ont plus de 600 millions d'années et presque la majorité des cratères ont été formés il y a moins de 100 millions d'années.

Sur la Lune, la surface n'est soumise ni à une activité érosive, ni à l'activité volcanique, ni à la tectonique des plaques, et les cratères ont donc plus de chance pour être conservé pendant des milliards d'années. Cet enregistrement permanent de ce processus géologique depuis la formation du système Terre-Lune a permis de tracer la chronologie du flux d'impact dans la Lune, la Terre, voire le système solaire interne, et il raconte aujourd'hui une grande partie de l'histoire de l'évolution de notre système solaire. Dès les années soixante, l'âge d'une surface planétaire a été relié à la densité de cratères qui la recouvrent via une relation empirique bâtie grâce aux échantillons lunaires issues des missions Luna et Apollo. En effet, une surface âgée aura été exposée longtemps aux impacts, et sera très cratérisée, tandis qu'une surface jeune, moins longtemps exposée, sera moins cratérisée (Hartmann1965). Les échantillons lunaires d'Apollo et Luna ont été analysés et datés par des méthodes de datations isotopiques (Stöffler & Ryder 2001) et la densité de cratères sur chaque région datée a été soigneusement calculée. La répartition par âge de ces échantillons a permet de connaître l'histoire du flux d'impact sur la Lune et plus largement dans le système solaire interne. Maintenant, les échelles chronologiques de tous les corps rocheux reposent sur les extrapolations des relations entre les densités de cratères sur la Lune et du temps d'exposition au bombardement déduite de l'analyse géochronologique des échantillons Apollo et Luna.

Il est à noter que les modèles de la chronologie par cratères ont été basés sur la taille des cratères observés à l'époque (diamètre de référence : > 1 km) (Neukum 1983; Neukum & Ivanov 1994; Neukum et al. 2001; Hiesinger et al. 2010). Ces modèles suggèrent que le taux d'impact dans le système Terre-Lune a commencé à diminuer après la formation du système solaire il y a 4,5 milliards d'années. Un modèle simple de cette diminution est une décroissance exponentielle du taux d'impact (voir Figure I.5), il suggère aussi qu'il y avait un pic intense dans le flux d'impact il ya 3,9 à 4,0 milliards d'années dans un événement appelé « grand bombardement tardif » (late heavy bombardment = LHB en anglais) (Hartmann et al. 2000; Koeberl 2006). Cette hypothèse a été motivée par la découverte d'un nombre étonnamment élevé de roches d'impacts endommagées à ces âges parmi les échantillons prélevés par les astronautes d'Apollo. L'hypothèse de grand bombardement tardif suggère que notre Lune (et, par conséquent, la Terre) a été ravagée par une augmentation spectaculaire du taux d'impact pendant cette période de bombardements tardif.

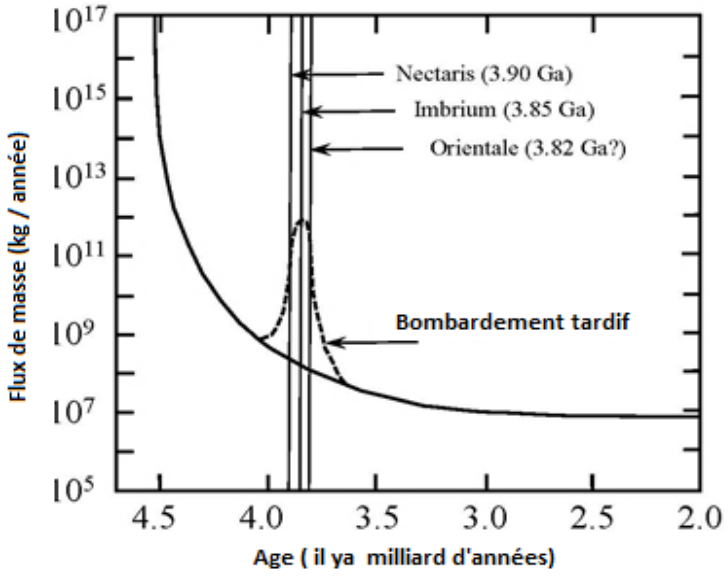


Figure I.5 : Le taux d'impact par unité de temps dans le système Terre-Lune, La courbe représente un flux avec décroissance exponentielle, la courbe en pointillés représente le grand bombardement tardif. L'âge des bassins d'impact majeurs sur la Lune sont indiqués (modifié à partir de Koeberl 2006).

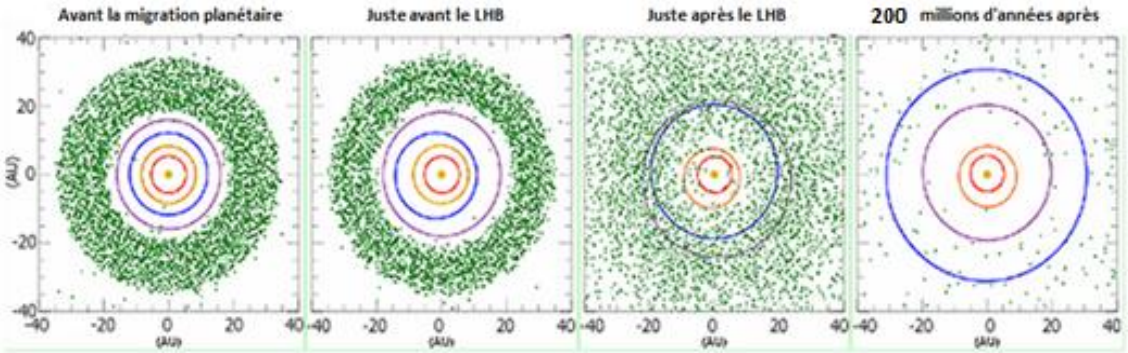


Figure I.6 : Schémas obtenus avec la simulation numérique, représentant l'évolution du système planétaire à différentes époques. De gauche à droite: Le début de la migration planétaire (100 millions d'années), juste avant le bombardement intense (à 879 millions d'années), juste après le bombardement (à 882 millions d'années), et 200 millions d'années après lorsque seulement 3% de la masse initiale du disque est restée et les planètes ont atteint leurs orbites finales. (Modifié à partir de Gomes et al. 2005.

Les théories de formation planétaire ne peuvent pas expliquer naturellement une période de bombardements tardif dans un cadre cohérent avec l'évolution du système solaire. Plusieurs modèles ont été proposés pour expliquer un pic d'impact tardif (Morbidelli et al. 2001; Zappala et al. 1998; Levison et al. 2001; Chambers & Lissauer 2002). Le modèle numérique aujourd'hui connu sous le nom de « Modèle de Nice » (Morbidelli et al. 2005; Gomes et al. 2005) propose que le LHB ait été déclenchée par la migration rapide des planètes géantes, qui s'est produite après une longue période de repos (figure I.6). L'hypothèse de

départ était que les 4 planètes géantes étaient en fait plus près du Soleil que maintenant, et entourées d'un ensemble de petits planétésimaux, il y a donc interaction gravitationnelle. L'excentricité des planètes était plutôt nulle (cercle), sauf pour Neptune qui avait une orbite très excentrique. Ce modèle montre que la plupart des petits corps sont éjectés soit vers l'intérieur (bombardement tardif de la Lune et la Terre notamment) soit vers l'extérieur du système solaire. La ceinture d'astéroïdes a été également fortement perturbée (ceinture verte dans la figure I.6), et ces objets représentent une partie significative des impacteurs de cette période, ceci est en conformité avec les preuves géochimique (Kring & Cohen 2002; Tagle 2005). Ce modèle explique non seulement naturellement le LHB, mais reproduit également les contraintes d'observation du système solaire externe (Tsiganis et al. 2005).

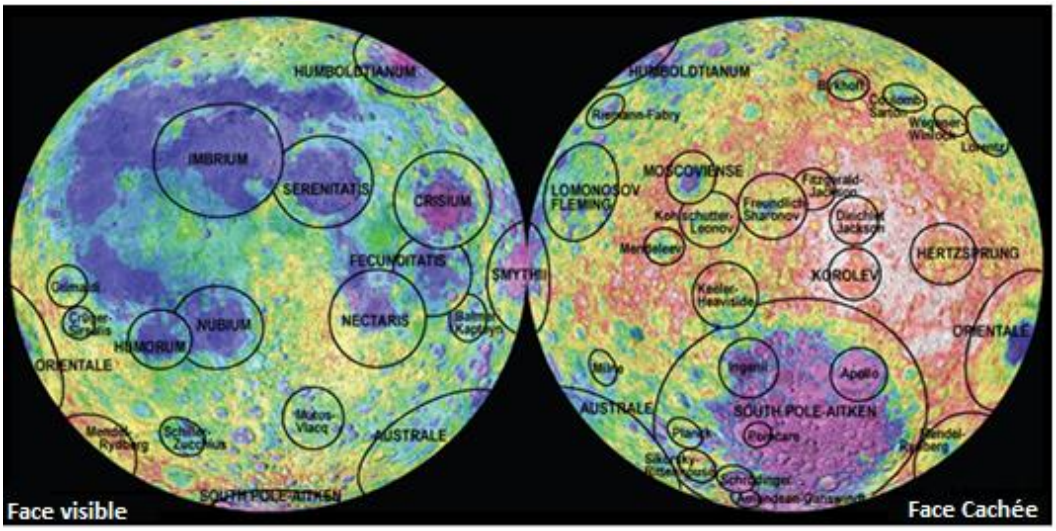


Figure I.7: Illustration des bassins lunaires sur la face cachée et la face visible lunaire (Crédit NASA/LPI).

Durant la période de grand bombardement tardif, certains astéroïdes frappant la surface lunaire avaient des diamètres dépassant les 100 km, et ils ont produit des bassins ayant des tailles de plusieurs centaines à plus de deux mille kilomètres. Cette série d'événements d'impact a généré la plupart des cratères observés sur les terrains lunaires fortement cratérisés (voir figure I.7), y compris les nombreux immenses bassins d'impact sur la Lune. Tous ces bassins ont été produits au début de l'histoire de la Lune au cours du 0,7 milliards années de l'origine du système solaire. Il n’est pas encore clair si cette époque de grand bombardement a durée tout l'intervalle de 0,7 milliard d'années (4,5 à 3,8 Ga) ou si la plupart des bassins ont été produits principalement pendant la période de bombardement concentrée autour de 3,9 Ga (Bottke et al. 2011).

II. Les corps impacteurs

Les astéroïdes et les comètes sont considérés comme des restes du disque protoplanétaire et ils ont été formés à peu près au début de la formation du système solaire. Ces petits corps qui voyagent dans l'espace nous renseignent sur le début de la formation du système solaire et l'histoire géologique des planètes, ce qui rend leur étude une tâche considérablement importante en astrophysique.

Actuellement, la majorité des astéroïdes orbite à mi-chemin entre les orbites de Mars (à 1,5 UA) et Jupiter (à 5,2 UA), dans ce qu'on appel la ceinture d'astéroïdes (entre 2,1 et 3,3 UA). La ceinture d'astéroïdes est composée de milliards d'astéroïdes de toutes les tailles, le plus gros (Cérès) faisant environ 1000 km de diamètre, et les plus petits ont la taille d'un caillou. La masse totale de la ceinture ne correspond qu'à 4% de celle de la Lune. De la meme façon que les planètes, la plupart des astéroïdes ont des orbites assez proches du plan de l'écliptique (inclinaison 10°-20°), dont l''excentricité est dans la gamme de 0,05 à 0,3. Ces objets peuvent éventuellement changer d'orbite à cause de l'influence gravitationnelle (résonances) des planètes ou tout simplement les collisions qui se déroulent à l'intérieur de la ceinture. Ces astéroïdes géo-croiseurs entrent inlassablement dans l'environnement terrestre ou plus largement, le système solaire interne. Ceux-ci ont une durée de vie de quelques millions d'années et finissent soit par entrer en collision avec le Soleil ou une planète. Jusqu'à Juin 2016, 14,470 astéroïdes géo-croiseurs seraient connus, parmi eux plus de 900 ont un diamètre de plus de un kilomètre (http://neo.jpl.nasa.gov/stats/). La collision avec un tel astéroïde peut détruire tout un continent, et même mettre fin à l'humanité si la vitesse d'impact est trop élevée. Actuellement, aucun astéroïde géo-croiseur n'est prévu pour entrer en collision avec notre planète. Les impacts par les objets faisant risque fatal à la vie sur Terre sont extrêmement rares (fréquence d'impact : > 300 000 ans).

Les collisions entre les astéroïdes dans la ceinture principale génèrent un grand nombre de fragments ayant des tailles variant du quelques millimètre à quelques dizaines de mètres. Intermédiaires entre astéroïdes et poussières interplanétaires, ces petits corps sont appelés 'météoroïdes'. Les géo-croiseurs sont la source principale qui délivre les grands météoroïdes dans le voisinage terrestre.

Les comètes sont principalement composées de glace et de poussière, le noyau est le corps principal d'une comète, et ce dernier n'est qu'à quelques kilomètres de diamètre. Ces petits corps voyagent en principe dans une orbite très elliptique autour du soleil, ils occupent

une large gamme de périodes orbitales (allant de plusieurs années à plusieurs millions d'années), et passent la majorité de leur temps loin du Soleil, dont que le noyau congelé qu'existe. Les comètes à courte période (<200 ans) proviennent de la ceinture de Kuiper qui s'étende à partir de l'orbite de Neptune (à 30 UA) à environ 50 UA du Soleil (similaire à la ceinture d'astéroïdes, mais il est 20 fois plus large et 20 à 200 fois plus massive). Les comètes à longue période sont considérées comme originaires du nuage de Oort, un nuage sphérique de corps glacés s'étendant depuis l'extérieur de la ceinture de Kuiper à mi-chemin de l'étoile la plus proche (150 000 UA).

Les comètes produisent également les météoroïdes, mais à travers un processus de sublimation (Ceplecha 1998; Whipple 1949; Borovicka 2001). Lorsqu'une comète se rapproche à quelques unités astronomiques du Soleil, le rayonnement réchauffe et sublime des quantités énormes de sa surface glacée, une partie de celle-ci devient gazeuse et se dilate dans l'espace. Les gaz dégagés traînent la poussière de la surface et forment autour de la comète un nuage ou une atmosphère temporaire appelée «Coma». Le coma devient plus grand et plus lumineux que la comète en se rapprochant du Soleil. À taille maximale, ce coma peut mesurer 100.000 km de diamètre, presque aussi grand que Saturne ou Jupiter. La faible gravité d'une comète ne peut pas tenir cette atmosphère temporaire et le coma s'éloigne de la comète pour former une queue.

Quelle que soit l'origine d'un météoroïde appartenant au système solaire, sa vitesse géocentrique étend de 11,2 km/s à 72,8 km/s. Les météoroïdes d'origine cométaire sont évidemment classés parmi les plus rapides, alors que les météoroïdes les plus grands sont souvent d'origine astéroïdale. Il n'y a pas de limite strictement définie entre les grands météoroïdes et les petits astéroïdes. Nous allons appeler les météoroïdes tous les corps avec un diamètre inférieure à 50 mètres et de plus de 50 micromètres. Les corps de moins de 50 µm sont des particules de poussière.

La Terre rencontre quotidiennement de nombreux corps de glace et de roche délivrés par les géo-croiseurs et les comètes, et la majorité de ces corps brûle et se désintègre dans l'atmosphère ''météore'' avant d'atteindre la surface. Certains d'entre eux (les plus gros météoroïdes) survivent à la traversée de l'atmosphère et arrivent à la surface de la Terre sous forme de ''météorite''. Les grands météoroïdes génèrent une forte onde de choc dans l'atmosphère, ce qui peut avoir des effets nuisibles sur la surface, comme dans le cas d'événement de Toungouska en Sibérie en 1908 (Vasilyev 1998) et de Tcheliabinsk en 2013 (Brown et al. 2013; Popova et al. 2013).

Jusqu'en 2014, nous comptons au total 22 météorites avec une orbite ou trajectoire de provenance bien déterminée instrumentalement (Borovička et al. 2015). Les orbites confirment que la plupart des météorites sont des fragments d'astéroïdes, mais une origine cométaire d'une petite fraction de météorites ne peut pas être totalement exclue. En outre, il a été constaté que certaines météorites, selon leur composition, doivent provenir de la Lune et d'autres de la planète Mars (Chennaoui et al. 2012), ces débris sont éjectés à la suite d'un impact avec un autre objet céleste.

Météore, est le rayonnement, et les phénomènes associés « chaleur, onde de choc, ionisation », causés par l'entrée d'un météoroïde dans l'atmosphère. Les météores "classiques" sont causés par des météoroïdes de plus de 0,01 mm. Un météore de magnitude visuelle égale à zéro est produit par un météoroïde de 2-cm de taille ayant une vitesse de 15km/s, ou 1-cm de taille et 30 km/s, ou 0.5-cm et 60 km/s. Un météore lumineux de magnitude stellaire - 4 (plus brillante que la planète Vénus) est appelée un bolide ou fireball. Le terme super-bolide est utilisé pour un météore plus brillant que la magnitude -17 (Ceplecha et al. 1998). Les bolides se produisent lorsque les corps supérieurs à ~20 cm (pour 15 km/s) entrent dans l'atmosphère terrestre. Dans tels cas, la masse entière du météoroïde n'a pas assez de temps pour effectuer une ablation totale, avant qu'il ralentisse à un seuil critique d'environ 3 km/s. A cette vitesse relativement faible, il n'y a pas assez d'énergie transportée à la surface du météoroïde pour maintenir la température de surface supérieure au point d'ablation. Comme la surface des météoroïdes commence à se refroidir, une couche fondue mince sur la surface des météoroïdes se solidifie formant une croûte typique des météorites (météorites récupérés à la surface de la Terre), appelée « croûte de fusion ».

Les pluies de météores sont causées par des météoroïdes d'une même origine, dans la plupart des cas, cette origine est cométaire. En principe, les météoroïdes laissés par une comète restent ensemble et s'arrangent en essaim étendu sur de grandes distances sur l'orbite de la comète. Ces essaims de météoroïdes rencontrent la Terre régulièrement chaque année dans la même période, et ils ont des directions d'incidence connus, chaque pluie à une nuit spectaculaire de pic d'activité bien définie au cours de laquelle on peut observer une dizaine de météores par heure. Les observations de ces pluies de météores permettent de remonter aux paramètres physiques des comètes et des astéroïdes croisant l'orbite de la Terre, ils fournissent des informations sur la distribution orbitale, les propriétés physiques, et (lorsqu'il est accompagné de l'observation spectrale) la composition de leur corps parents. L'étude de l'évolution de ces essaims fournit également des informations directes sur les prévisions de

rencontre avec la Terre (Vaubaillon et al. 2005), et c'est particulièrement important pour évaluer le risque que représentent ces essaims de petits corps sur les satellites artificiels de télécommunication (Vaubaillon 2003).

Les astéroïdes sont donc les impacteurs les plus présents dans le système solaire. Le bombardement permanant durant toute l'année, est le bombardement généré par les météoroïdes sporadiques qui voyagent indépendamment dans l'espace. Ils proviennent de n'importe quelle direction, et contrairement aux météoroïdes appartenant aux essaims et qui sont en général d'origine cométaire ayant une taille supérieure limitée, les météoroïdes sporadiques peuvent être de grande taille, et ce sont ces impacteurs qui donnent lieu aux bolides et super-bolides. Les événements sporadiques se produisent quotidiennement dans notre environnement, et leur observation et essentielle pour étudier le flux d'impact dans le système solaire, et plus particulièrement, le système Terre-Lune.

Les astéroïdes, les comètes et les météoroïdes maintiennent des informations pertinentes sur l'origine du système solaire. En outre, il est important de comprendre les différents comportements d'interactions avec les planètes et les lunes de notre système solaire, et bien sûr évaluer le risque encouru par l'humanité et la vie terrestre.

Il est à noter que ces phénomènes ne sont pas limités à la Terre. Des météorites (Fairén et al. 2011), et des champs de cratères frais (Daubar et al. 2013) ont été découverts sur la surface de Mars et les super-bolides ont été aussi observés dans l'atmosphère de Jupiter (Hueso et al. 2013). Sur les corps sans atmosphère, comme la Lune par exemple, les météoroïdes chutant sur sa surface ne rencontrent aucun obstacle et ces collisions produisent des cratères, des ondes sismiques ainsi que les phénomènes transitoires lumineux appelés «flashs lunaires».

III. Quelques événements remarquables récents

III.1. Le flash lunaire de 1953

Le 15 Novembre 1953, l'astronome Dr. Leon H. Stuart a observé et photographié par coïncidence un flash non confirmé sur la Lune (Stuart 1956). Stuart a estimé que le flash a duré moins de 8s et s'est produit au centre du disque lunaire à environ 15 km au sud-est du cratère Pallas (Figure I.8).

Cinquante ans plus tard, le Dr. Bonnie Buratti du Jet Propulsion Laboratory a rapporté l'identification d'un cratère de 1.5 km de diamètre, il a étudié ce cratère comme étant résultant

de l'événement de 1953 (Bonnie Buratti 2003). Ce cratère a été trouvé dans les données de l'orbiteur Clementine, qui a cartographié la lune entière en 1994. Ce cratère correspondait à la position du flash lumineux comme on le voit dans l'image. Le cratère apparaît frais, lumineux et bleuâtre, qui sont les caractéristiques d'un cratère très jeune (Figure I.9). La taille estimée de l'impacteur était d'environ 20 m, produisant un cratère de 1 à 2 km de diamètre.

Figure I.8: Photo du flash lunaire de 1953 (Stuart 1956). L'image a été obtenue avec un télescope de 8 pouces en utilisant un film Kodak 103aF3 avec un temps d'exposition de 0,5 s.

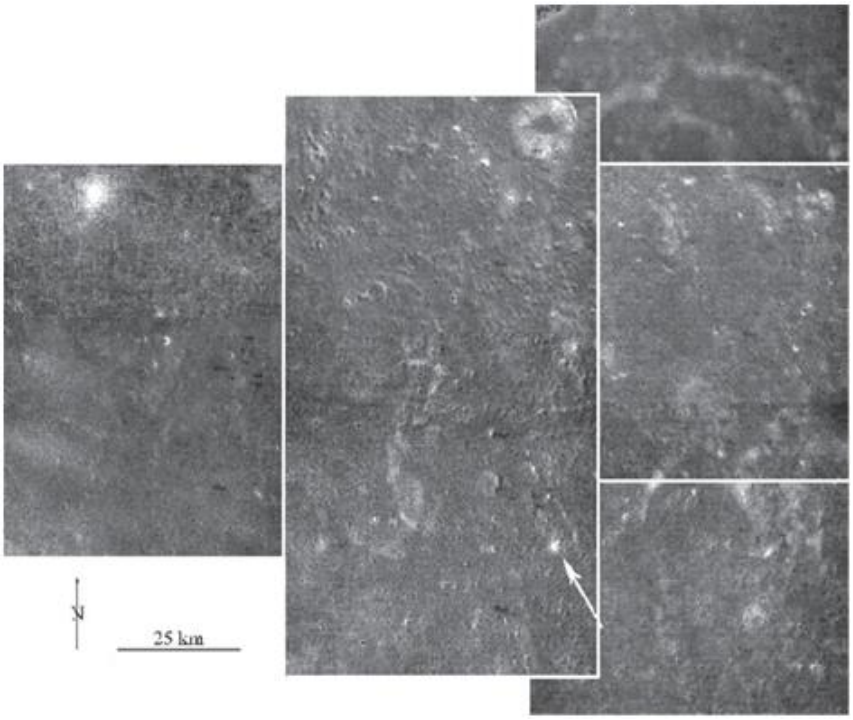


Figure I.9: Une mosaïque de Clementine créée à partir d'images UV/VIS (Bonnie Buratti, 2003). Le site de l'impact observé par Stuart est au centre de la mosaïque et indiqué par la flèche.

III.2 Les collisions des fragments de la comète Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter

Du 16 Juillet au 22 Juillet 1994, des fragments de la comète P/Shoemaker-Levy 9 ont percuté Jupiter, donnant lieu à des effets spectaculaires sur la planète gazeuse. C'était la première fois qu'un impact a été formellement observé sur une planète (ou tout autre corps outre que la Lune), car il a été anticipé depuis longtemps, permettant à de nombreux groupes de se préparer à de bonnes campagnes d'observation. Presque tous les observatoires de la Terre ont été impliqués, ainsi que des engins spatiaux interplanétaires, y compris le télescope spatial Hubble, Galileo, Ulysses, et Voyager 2.

En juillet 1992, durant son passage à proximité de Jupiter, l'orbite de la comète Shoemaker-Levy 9 a croisé la limite de Roche de Jupiter, les forces de marée de Jupiter ont alors agit pour séparer la comète en différents morceaux. La comète Shoemaker-Levy 9 s'est décomposée donc en vingt fragments discernables avec des diamètres estimés jusqu'à 2 km, qui ont impacté la planète à 60 km/s, les images des fragments, illustrés dans la figure I.10 ont été prise par le télescope spatial Hubble en Juillet 1993. Les fragments ont frappé la planète géante un par un juste au-delà de l'horizon Jovien visible depuis la Terre, la Figure I.11 montre l'évolution d'un bolide après cet impact. La sonde Galileo a capturé de nombreuses images des impacts par plusieurs fragments, y compris un par le Fragment W (Figure I.12), pris sur une période de 7 secondes le 22 Juillet de 1994. Les observateurs terrestres ont également détecté ces impacts, François Colas astronome de l'IMCCE a observé la chute du fragment H avec le télescope de 1 mètre du pic de midi (Figure I.13).

Les scientifiques ont été en mesure d'utiliser ces impacts pour sonder l'atmosphère de Jupiter, pour comprendre sa structure verticale et sa composition. Cela a été fait à l'aide des simulations numériques en se basant sur l'ancien modèle de l'atmosphère. Ils ont ensuite comparé les résultats du modèle avec les observations et ont recueilli des informations pour ajuster le modèle afin de mieux représenter la véritable atmosphère jovienne. En plus de sonder la structure physique de l'atmosphère de Jupiter, et améliorer les modèles, les impacts de Shoemaker-Levy 9 nous rappellent que les collisions dans le système solaire se produisent tout le temps et partout dans le système solaire.

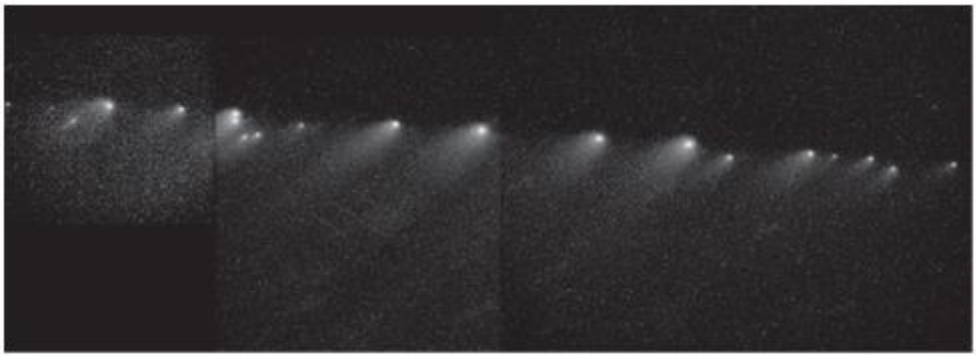


Figure I.10 : Les fragments de la comète Shoemaker-Levy 9 en image avec le télescope spatial Hubble (Crédit STScI et la NASA).

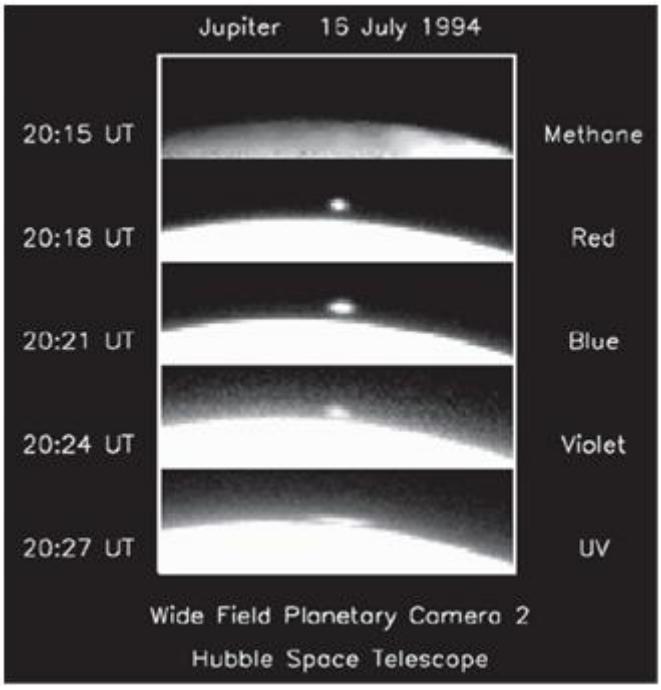


Figure I.11 : Images prises par Hubble après le premier impact (fragment A), le jet de matière s'élève au-delà du disque de Jupiter (crédit : HST Jupiter Imaging Science Team).

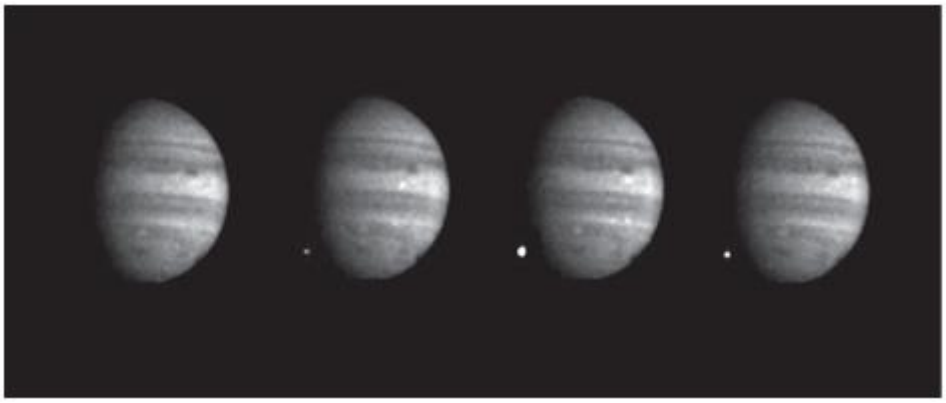


Figure I.12 : Séquence d'impact montrant le flash d'impact du Fragment W sur Jupiter, prise par le vaisseau spatial Galileo en route vers Jupiter à cette époque (crédit NASA/JPL).

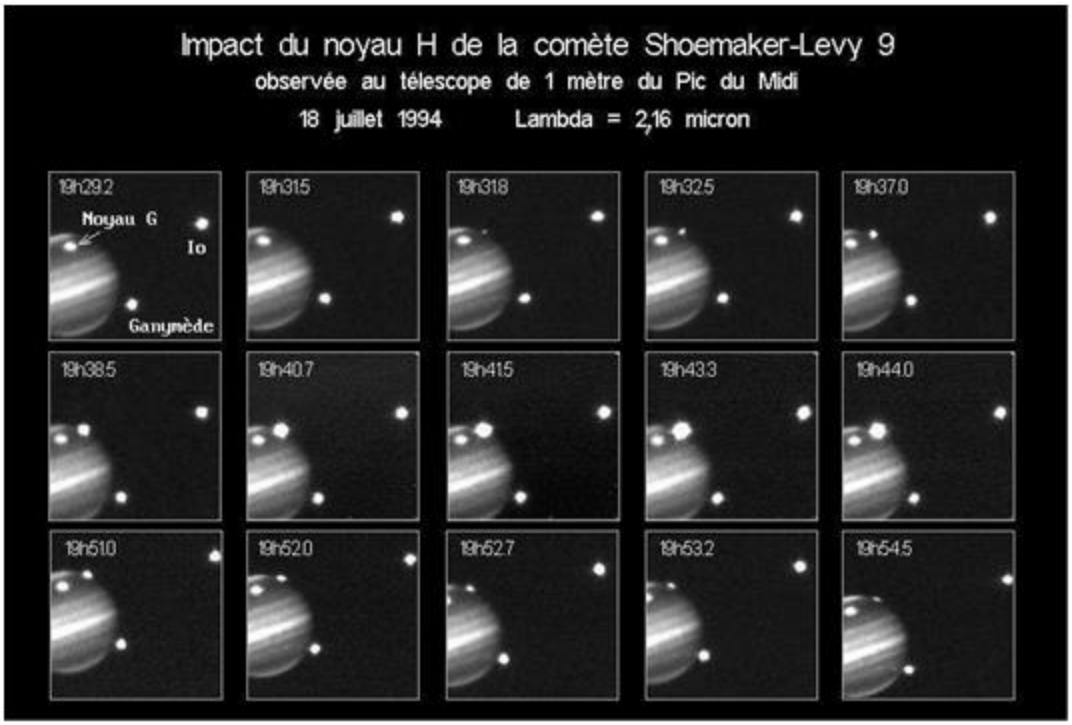


Figure I.13 : Le flash d'impact du fragment H prise par le télescope de 1 mètre du pic du midi par l'astronome François colas (crédit : IMCCE).

III.3 L'impact des Léonides sur la Lune en 1999

Les courants de poussières et de petits corps laissés par une comète (ou parfois un astéroïde) produisent les tempêtes de météores lorsqu'ils rencontrent la Terre. Les léonides sont causées par le passage de la comète 55 P/Tempel-Tuttle qui a une période de 33 ans, et qui s'est désintégré en 1899. Ils sont très rapides et ils rencontrent la trajectoire du système Terre-lune à 71 km/s au minimum (Beech 1998). Les Léonides sont les plus célèbres et les plus spectaculaires des météores, et ils ont eu un effet majeur sur le développement de l'étude scientifique de ceux-ci. À partir des observations de la tempête de 1833 et de 1966, les scientifiques ont pu étudier avec plus de précision l'orbite des Léonides et leur évolution (Kronk 1988; Jenniskens 1995; Brown 1999). Des simulations numériques de l'évolution des Léonides ont suggéré la possibilité d'une activité intense au niveau de la tempête le 18 Novembre 1999 (Brown 1999; McNaught & Asher 1999). La tempête de 1999 été une opportunité exceptionnelle pour attiré l'attention de la communauté scientifique. Plusieurs campagnes internationales d'observation ont été réalisé en 1999, et c'était une occasion pour améliorer les techniques d'observations des météores (Visuelle, Photographique, radar, vidéo et spectroscopiques), ainsi que les techniques d'analyse, en comparant les résultats obtenues à partir de chaque méthode, c'était aussi l'occasion pour améliorer les techniques de prédictions des pluies de météores à la base de la simulation et la modélisation numérique. Il a également

été souligné que la tempête de Léonides 1999 offrirait une occasion unique pour enregistrer les flashs associés à des météoroïdes impactant la Lune grâce au flux considérablement important de particules prévues et aux conditions géométriques favorables de la rencontre, il y avait également des efforts pour observer les impacts des Léonides sur la Lune en 1999.

Le 18 Novembre 1999, la Terre et la Lune traversaient à nouveau le flux Léonid formé par les fragments de la comète 55P / Tempel-Tuttle qui désintégré en 1899. La Lune avait une approche de moins de 0,0002 UA (unités astronomiques) à l'essaim des Léonides. Pour la première fois, plus de 10 flashs lunaires ont été observées avec succès sur le côté nuit de la Lune (Dunham et al, 1999; Dunham et al, 2000; Ortiz et al, 2000). La magnitude des flashs observés variait de 3 à 7. La plupart des flashs étaient moins de 0,1 s de durée (voir exemple de la figure I.14).

Les Léonides 1999 ont démontré expérimentalement et pour la première fois que les caméras CCD attachés aux télescopes de 0,2 m de diamètre peuvent réussir la détection des émissions associées aux chutes des météoroïdes sur la lune.

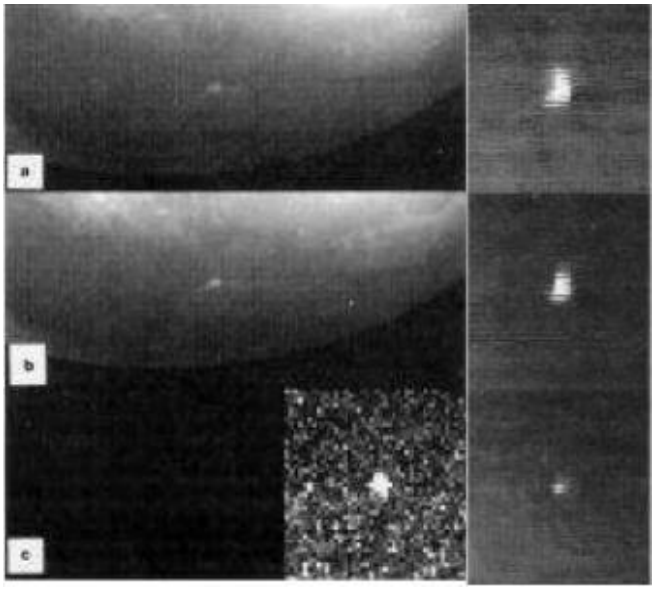


Figure I.14 : Un flash d'impact observé durant le pic des léonides en 1999 (Ortiz et al, 2000).

III.4 L'évènement de Tcheliabinsk

L'explosion aérienne d'un astéroïde d'environ 19 mètres de diamètre au sud-est de Tcheliabinsk, en Russie, le 15 Février 2013, été un événement unique fondamentalement différent de toute autre chute de météorite dans l'histoire récente. Il a été précédé par un super-bolide extraordinairement brillant, plus brillant que le Soleil, et accompagné par une onde de choc. Les habitants de Tcheliabinsk n'ont eu que deux minutes d'avertissement

environ, à partir du moment où ils ont vu le flash du météore traverser l'atmosphère, jusqu'à ce que l'onde de choc frappe la ville, provoquant l'effondrement d'une usine de zinc et endommager les toits de plusieurs bâtiments. Les dommages les plus graves sont l'explosion des fenêtres dans des milliers de bâtiments; les morceaux de verre ont blessé environ 1500 personnes, qui étaient près de leurs fenêtres pour observer le phénomène lumineux.

L'événement Tcheliabinsk (figure I.15) a été détecté par de multiples instruments, y compris les infrasons, les capteurs sismiques, les satellites militaires et plus de 400 caméras vidéo de surveillance installées à des distances allant jusqu'à 700 km d'espacement dans les différentes zones de la ville (la plupart à bords des voitures). L'analyse de données, a montré que l'énergie totale était ~ 500 kT de TNT, soit 2×10^{15} J (Brown et al, 2013; Popova et al. 2013). Cette énergie est environ 30 fois plus importante que l'énergie de la bombe atomique d'Hiroshima. Bien que l'explosion d'un astéroïde près de la rivière Toungouska en Sibérie en 1908 ait beaucoup plus puissante, et l'énergie estimé à 5-20 MT TNT (Vasilyev 1998; Boslough & Crawford 2008), les données qui existent restent limitées, l'évènement a eu lieu sur une région très éloignée et aucune météorite n'a été récupérée.

Les événements comme ceux de Toungouska, Tcheliabinsk ainsi que d'autres évènements qui ont été rapporté dans les 100 dernières années (qui peuvent peut-être de taille similaire, ou même plus grand que le météore Tcheliabinsk (Dunhum. 2013) ont clairement mis en évidence le potentiel de dommages des petits astéroïdes (10-30 de mètres), et ont permis de constater que le nombre de géo-croiseurs dans cette gamme peut être un ordre de grandeur plus élevé que les anciennes estimations (Brown et al. 2013, Harris & D'Abramo 2015), et cela suggère un déséquilibre dans la population d'astéroïdes géo-croiseurs de 10 à 50 mètres de diamètre.

Il est à noter que les missions d'observations télescopiques ont seulement découvert environ 2000 astéroïdes géo-croiseurs qui ont 10-30 mètres de diamètre (http://neo.jpl.nasa.gov/stats/), est c'est parmi une population d'astéroïde géo-croiseur estimée autour de 2×10^{7} (Harris & D'Abramo 2015), ce qui suggère un déséquilibre dans la population d'astéroïdes géo-croiseurs pour les objets de 10 à 50 mètres de diamètre, mais pas encore apparent dans la population d'astéroïdes géo-croiseurs découvert jusqu'à maintenant (Brown et al. 2013).

Figure I.15 : Le grand météore imprévu et complètement inattendu qui a eu lieu en Russie le 15 Février 2013 photographié et filmé depuis différentes endroits à Tcheliabinsk, ainsi que le site d'impact de la masse principale de la météorite (un trou de 8 mètres de diamètre a été formé dans la glace du lac Tchebarkoul, 70 km à l'ouest de Tcheliabinsk.

III.5 Flash lunaire de 17 mars 2013

Le 14 Décembre 2013, l'équipe de LROC (pour Lunar Reconnaissance Orbiter Camera) a annoncé l'identification d'un nouveau cratère sur la Lunaire formé entre le 12 Février 2012 et 28 Juillet 2013 (détaillé en chapitre II), situé à 20,7135° N, 24,3302° W, ayant un diamètre de 18m (15m de diamètre intérieur) (Robinson et al. 2014).

Ce cratère est le résultat d'un impact enregistré au NASA-MSFC (Marshall Space Flight Center) le 17 Mars 2013 à 03:50:54,3 UTC (Suggs et al. 2014) par l'équipe de MEO-Meteoroid environment office au MSFC qui réalise des observations des flashes lunaires régulièrement depuis 2005. Ce flash d'impact a été le plus long flash jamais observé et confirmé à cette date (Mars 2013 ; approximativement 1s). De plus, c'était la première fois qu'on identifiait un cratère frais qui correspond un flash lunaire observé et techniquement confirmé (figure I.16). Les calibrations photométriques donnant une magnitude au pic de 3,0 ± 0,4, ceci correspond à une énergie lumineuse de l'ordre $7,1 \times 10^6$ J (Suggs et al. 2014).

En tenant compte des observations du 'NASA All Sky Fireball Network' (Cooke & Moser 2011) et 'Southern Ontario Meteor Network' (Weryk et al. 2008), la pluie complexe 'Virginid Meteor' été très active au cours de la nuit où le flash été observé. En supposant que l'impacteur est associé à cet essaim de météoroïdes et qui avait une vitesse de 25,6 km/s,

Suggs et al. 2014 estime une énergie cinétique d'impact de $5,4 \times 10^9$ J et une masse de 16 kg. En supposant un angle d'incidence de 56° par rapport l'horizontale, déterminé à partir des mesures orbitales des bolides terrestres, une densité de régolithe de 1500 kg /m^3, et une densité de projectile entre 1800 et 3000 kg /m^3, le diamètre intérieur du cratère a été estimée à 9-15 m et 12-20 m par utilisation des modèles de Holsapple (1993) et Gault (1974) respectivement. Ce qui est compatible avec la taille du cratère observé, par l'équipe de LROC (Lunar Reconnaissance Orbiter Camera).

III.6 Flash lunaire du 11 septembre 2013

Depuis 1999 jusqu'à 2013, tout les flashs observés avaient une durée de moins de 0,2 s. Le flash observé par l'équipe américaine (1 seconde) de NASA-MSFC était sans précurseur. Au cours de la même année, une équipe espagnole a annoncé la détection d'un flash extrêmement long, avec une durée de 8 secondes.

En 2009, une équipe d'astronomes espagnols s'intéressant aux observations des flashs lunaires depuis 1999 a réalisé, dans le cadre d'une collaboration entre trois universités, un projet nommé MIDAS, qui est l'acronyme pour 'Moon Impacts Detection and Analysis System'. Dans ce contexte, le 11 Septembre 2013, ce groupe a observé et enregistré un flash extraordinaire d'une durée de plus de 8 secondes et une magnitude V de 2,9 produit par l'impact d'un météoroïde sur la Lune (coordonnées : 17,2 ± 0,2 º S, 20,5 ± 0,2 º W). Ceci est le flash le plus brillant et le plus long jamais enregistré sur la lune (Celui de NASA-MSFC est devenu deuxième, le flash photographié par Mr. Stuart en 1953 reste un flash probable). L'énergie cinétique de l'impacteur a été estimée à environ $6,5 \pm 1,0 \cdot 10^{10}$ J (figure I.17).

Madiedo et al. 2014 estimes une masse de projectile de 450 kg si son origine est sporadique. Dans ce cas, le diamètre du cratère produit par cet impact a été estimé dans l'intervalle : 47 m (pour une masse volumique de 0,3 g cm^{-3}) et 56 m (pour 3,7 g cm^{-3}).

Cependant, le 9 Septembre 2013, deux jours avant la détection du flash, une pluie de météores mineure, appelée ε-Perséides de Septembre (SPE) était active. Avec une vitesse géocentrique autour de 64,5 km/s (Jenniskens 2006), les météoroïdes SPE auraient chutés sur la Lune avec une vitesse qui est considérablement plus élevée que la vitesse d'impact moyenne de météoroïdes sporadiques (16-17 km/s). Si le projectile appartenait aux SPE, la masse estimée est autour de 46 kg, le cratère produit par cet impact est d'environ 46 m.

Comme c'était le cas pour le flash du 17 mars, l'équipe de LROC a ciblé les coordonnées d'impact déclarées par Madiedo et al. 2014 (17,2° S, 339,5° E) et plusieurs

images ont été acquises pendant quelques mois après l'événement pour comparaison avec les anciennes images prises par LROC avant la date d'observation du grand flash.

Le 15 Septembre 2014, Mark Robinson PI de LROC a annoncé que le cratère a été trouvé dans des images prises le 16 Mars 2014 et 13 Avril 2014. Le cratère trouvé est de 34 mètres et les effets des éjectas sont visibles et s'étendent à plus de 500 mètres dans toutes les directions (voir figure I.17).

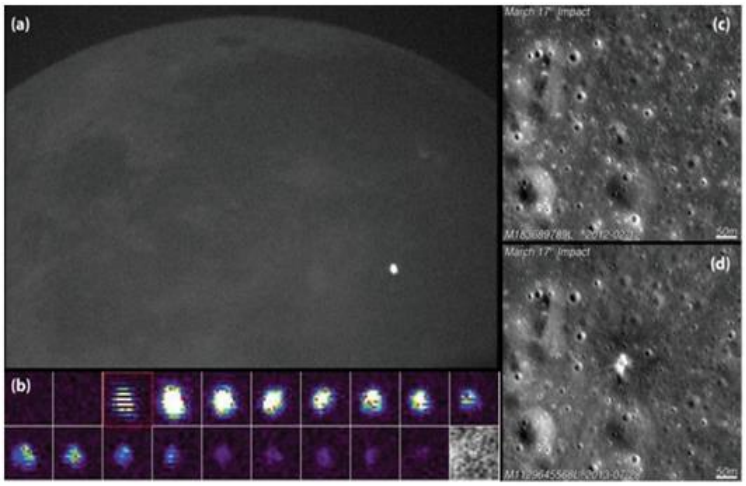


Figure I.16 : Flash d'impact lunaire observé le 17 Mars 2013 à MEO-MSFC de la NASA (Suggs et al. 2014). Panneau (a) est le champ de vision complète à l'instant de l'événement. Panneau (b) est le zoom sur la séquence des images vidéo successives (1/30 sec). Panneau (c) est le site d'impact avant et (d) après l'événement capturé par la caméra de 'Lunar Reconnaissance Orbiter'.

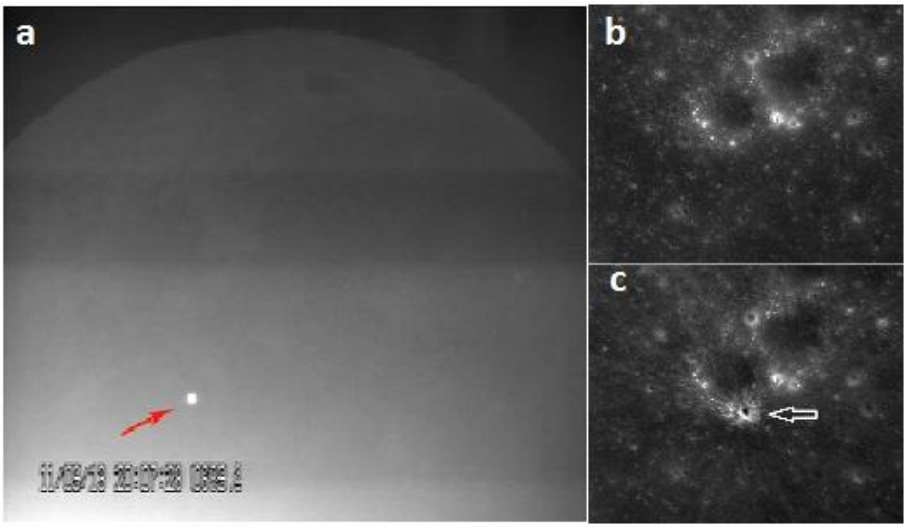


Figure I.17 : Panneau (a) Flash d'impact détecté de Séville par le 0,28 m télescope le 11 Septembre 2013 Madiedo et al, 2014. Panneaux (b) et (c) sont les images de LROC correspondes au site d'impact prises avant et après l'événement (le cratère est indiqué par la flèche).

IV. Flux d'impact présent dans le système Terre-Lune

Comme noté dans la section I, l'évolution du taux d'impact sur la Lune a été estimée en calculant les densités des cratères (dans une gamme de tailles donnée) sur une variété de régions ayant des âges connues grâce aux datations isotopiques des échantillons lunaires dont nous disposons. Sur les dernières 3,5 milliards d'années, le flux d'impacts aurait été constant. Cependant, la chronologie absolue lunaire est peu contrainte pour cette période, car la plupart des échantillons de la mission Apollo datent d'avant cette période, ce qui rend la variation du flux d'impact avec le temps, en particulier sur les 3 milliards d'années dernières, est mal connue (Quantin et al. 2007; Marchi et al. 2009). Une estimation du taux actuel de formation des cratères sur la surface de la Lune a été proposé par (Neukum 1983), pour une gamme de diamètre entre 1 m et 1 km, ce taux peut s'écrire sous la forme : $\log(n) = -3\times\log(d) + 4{,}88$, où n est le nombre cumulé de cratères qui se produisent chaque année sur toute la surface lunaire avec un diamètre supérieur ou égale à d (exprimé en mètre).

Il a également été montré que le taux des cratères varie avec la position, à la suite de la distribution non isotrope de paramètres orbitaux des impacteurs et des paramètres orbitaux de l'objet (Le Feuvre & Wieczorek 2008, 2011). Le taux de cratères (supposé constant sur les 3 Ga derniers) est comparable dans un ordre de magnitude avec le flux d'impact déduit de détonations associées à des bolides dans l'atmosphère de la Terre, ou avec le flux déduit des impacts enregistrés par les sismomètres Apollo (Brown et al. 2002; Ivanov 2006; Mimoun et al. 2012). Cependant, les différentes quantités physiques mesurées telles que le diamètre de cratère, l'énergie sismique, les radiations lumineuses, sont liées à des comparaisons impliquent l'utilisation de lois empiriques limités (Mimoun et al. 2012; Oberst et al. 2012).

Durant les dernières années, tout d'abord sur Mars et maintenant sur la Lune, et grâce aux cameras à bord des engins spatiaux récemment lancés, l'imagerie des surfaces est devenue plus en plus précise permettant l'accès à la densité des cratères qui ont des tailles aussi petites que 10 m de diamètre, cela va permettra d'extrapoler et tester la fiabilité de la chronologie lunaire faite pour les cratères de diamètres supérieures à 1 km. À titre d'exemple, le nouveau comptage (fait par Hiesinger et al. 2010) sur la jeune surface du cratère Copernic cartographiée dans les images de Lunar Reconnaissance Orbiter, a pu corriger le désaccord (rapporté par Neukum & Ivanov 1994) entre l'âge radiométrique du cratère et la fréquence des cratères superposés sur sa surface.

La plupart des grands (plus d'un kilomètre de diamètre) astéroïdes géo-croiseurs sont maintenant connus. Mais le flux d'impacteurs est plus incertain si nous considérons les

météoroïdes ayant des diamètres inférieurs à 140 m. Malgré le fait que leur nombre est considérablement important dans le milieu interplanétaire (voir chapitre II, section II.1), la détection de ces petits corps reste une tâche relativement difficile même en utilisant des télescopes spatiaux sophistiqués, ceci est dû à leurs petites surfaces réfléchissantes et leurs émissions thermiques faibles. Ces petits objets peuvent encore causer des dommages considérables, comme survenu en 1908 près de Toungouska, en Sibérie, et la détonation atmosphérique d'un astéroïde de 17 m au-dessus de Tcheliabinsk en Russie le 15 Février 2013. L'onde de choc qui a eu lieu à Tcheliabinsk était un facteur important pour donner l'alerte et attirer plus l'attention sur les petits astéroïdes, celle-ci a démontré le danger des petits corps en explosant dans la haute atmosphère avec la force d'une puissante bombe atomique ou plusieurs fois supérieure.

Il est estimé que près de 4500 petits corps de plus de 1 kg de masse chutent chaque année sur la Terre (Halliday et al. 1989). Les télescopes basés au sol ont trouvé quelques petits objets considérés non dangereux, tels que 2008 TC3, un astéroïde de 4 m qui a été découvert 20h avant son explosion au-dessus du Nord-Est du Soudan (Jenniskens et al. 2009). L’astéroïde 2008 TC3 reste le seul astéroïde découvert par les grands télescopes avant qu'il ne percute la Terre, parce qu'il approchait de la Terre à partir du côté de la nuit, où il a réfléchi assez de lumière solaire vers la Terre pour qu’il soit observable.

Plusieurs techniques ont été considérées dans le passé pour évaluer le flux de petits corps dans l’environnement terrestre. Chaque technique est adaptée à une gamme de taille des impacteurs, et aucune technique n’est valable pour toutes les gammes. Par conséquent, les résultats de différentes techniques doivent être liés.

Le flux de grands météoroïdes (dans la gamme 0,1-1 m de diamètre) a traditionnellement été estimée à partir la détection des bolides avec des caméras all-sky (par exemple, Ceplecha 1988; Halliday et al. 1996), tandis que le flux des corps les plus grands (de diamètres compris entre 1-10 m) a été déterminé à partir d'une combinaison de données de détecteurs acoustiques depuis les satellites militaires et les récepteurs des infrasons basés au sol (Brown et al. 2002). D'autre part, le flux des astéroïdes de plus de 10 m a été déduit à partir de l’intégration des éléments orbitaux des objets géo-croiseurs découverts par différentes programmes d’observations télescopiques. Un flux moyen temporel peut également être déduit à partir des comptages de cratères lunaires en utilisant les lois d'échelle pour relier la taille des cratères aux diamètres des impacteurs. Toutes ces techniques ont de grandes incertitudes et d'éventuels biais systématiques, qui sont difficiles à évaluer et

comparer. Une synthèse de ces techniques montre une grande différence au niveau du taux d'impact estimé pour les objets de 10 à 50 m de diamètre (énergie d'impact : 0,1-10 Mt). Pour cette gamme de taille, le taux d'impact basé sur les mesures infrasons est un ordre de grandeur plus élevé que les estimations réalisées par les surveillances télescopiques (Silber et al.2009).

La Figure I.18 montre le nombre d'objets qui entrent en collision avec la Terre en fonction de l'énergie comme il a été estimé à partir de plusieurs techniques indépendantes.

Halliday et al. (1996) ont utilisé les données du réseau de fireballs MORP pour trouver le flux d'impacteurs dans la gamme entre quelques dizaines de grammes et quelques kilogrammes à partir d'un produit durée-superficie de surveillance équivalent à une journée complète de couverture globale de l'atmosphère terrestre (ligne rouge dans la figure I.18). Notamment, il a été constaté que près de 40% de toutes les bolides dans cette gamme de taille ont été associés à des pluies de météores, et que la proportion des météoroïdes d'origine astéroïdale (par opposition à cométaire) augmente si de la gamme de taille considérée augmente, passant à 70% si les météoroïdes considérés ont des masses de plus de 1 kilogramme.

Brown et al. (2002) a utilisé les données provenant des détecteurs satellites spatiaux militaires, pour détecter les ondes de choc des grands bolides causés par des météoroïdes ayant des tailles de plusieurs mètres sur une période de huit ans (points noirs). Le nombre cumulé résultant de ces impacts par an (N) en fonction de l'énergie (E) (en de kilotonnes de TNT = 4.185×10^{12} J) a été estimé par la loi de puissance suivante (ligne noir) : $N = 3,7\ E^{-0.9}$. Cet ajustement est approprié à des énergies de 0,1 à 10 kT ou diamètres allant de 1 - 6 m. Une extension de cette étude par Brown et al. 2013 a constaté un taux similaires à basses énergies, mais un flux au dessus de la courbe de puissance aux grandes énergies.

Silber et al. 2009 ont utilisé les enregistrements acoustiques et infrasons des impacts sur une période de 14 ans pour estimer indépendamment ce flux dans une gamme de taille similaire (à présenter en chapitre III). Leur flux est systématiquement plus élevé que la courbe de la loi de puissance de Brown et al. (2002) ainsi que les surveillances télescopiques des petits astéroïdes, mais en accord avec la marge d'incertitude des valeurs révisées à grandes tailles (> 6 m) dans Brown et al. 2013.

Les surveillances télescopiques directes des géo-croiseurs sont largement utilisées pour estimer les flux dans les tailles supérieures à 10 m de diamètre. Ces estimations conviennent généralement bien avec l'extrapolation de la loi de Brown et al. 2002. En outre, dans

l'intervalle 10-100 m, le taux d'impact issu de la surveillance télescopique a des incertitudes fondamentales liées à l'indétermination de la probabilité des collisions ainsi que la distribution de l'albédo des petits astéroïdes.

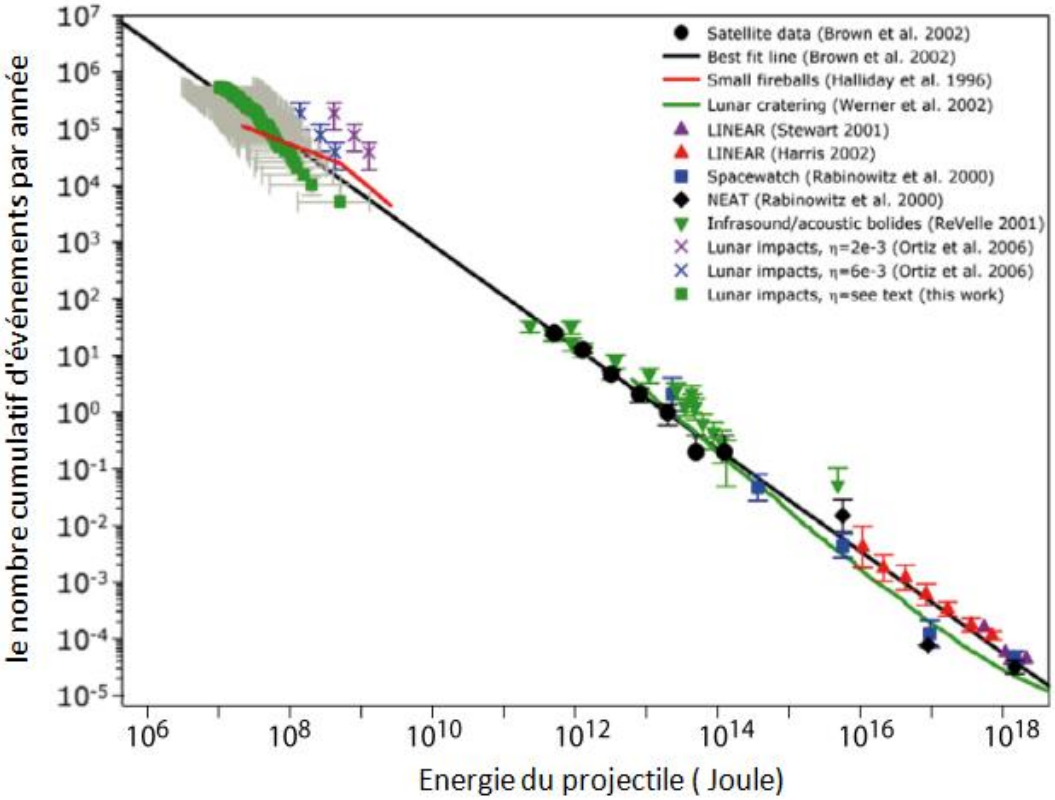


Figure I.18 : Histogramme cumulatif des événements de collision avec la Terre en fonction de l'énergie Suggs et al. 2014.

Le taux d'impact terrestre peut être confirmé séparément en surveillant le coté nocturne du disque lunaire entre le dernier quartier et le premier quartier. La technique d'observation des flashes lunaires pourrait être utilisée pour dériver le flux de météoroïdes ayant des masses supérieures à 50 g. Cette technique a l'avantage par rapport à la surveillance atmosphérique par la grande zone collectrice lunaire couverte par un seul instrument de surveillance, qui peut progresser selon la phase d'observation et la configuration instrumentale de 2 à 8 millions km^2, au lieu de 3 à 10 milles km^2, qui est la zone de collecte atmosphérique d'une caméra All-Sky. Les avantages et les inconvénients de cette méthode vont être examinés avec plus de détails dans le chapitre II.

Suggs et al. (2014) a examiné le flux dérivant des flashs lunaires (carrés verts). Comparé à Halliday et al (1996) (ligne rouge), plus de différence est apparente dans les plus petites tailles, et le flux absolu est plus bas avec plusieurs facteurs dans la gamme des

kilogrammes. Suggs et al. (2014) notent aussi que la proportion des projectiles associés aux pluies de météores dépasse 60%. Bien que la plupart des données de Suggs et al. 2014 sont dans la gamme de masse des dizaines de grammes, en dessous du niveau où l'étude de Halliday et al. (1996) est complète, l'échelle de masse incertaine dans les deux études peut être la cause.

Compte tenu de ces différentes sources d'incertitudes à travers toutes les surveillances présentées dans la figure I.18, le degré d'accord reste bon et significatif. D'autres examens et comparaisons supplémentaires de ces techniques d'observations seront examinés dans le cadre du 3ème chapitre, dans lequel les résultats de nos campagnes d'observations seront aussi présentés.

Références

Alvarez LW, Alvarez W, Asaro F, Michel HV, 1980. « Extraterrestrial cause for the Cretaceous–Tertiary extinction », Science, vol. 208, no 4448,, p. 1095–1108.

Andrews-Hanna, J. C.,Zuber, M.T.&Banerdt,W. B.The Borealis basin and the origin of the martian crustal dichotomy. Nature (2008) doi:10.1038/nature07011.

Beech Martin (1998) « Large-Body Meteoroids in the Leonid Stream », The Astronomical Journal, vol. 116,, p. 499–502.

W. BENZ, W. SLATTERY, A. G. W. CAMERON. Collisional Stripping of Mercury's Mantle iCARUS 74, 516--528 (1988).

Bonnie J. Buratti and Lane L. Johnson. Identification of the lunar flash of 1953 with a fresh crater on the Moon's surface. Icarus 161 (2003) 192–197.

Borovicka, J. 2001, Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics. Murdin, P., Institute of Physics Publishing and Nature Publishing Group, 1720.

Jiří Borovička, Pavel Spurný and Peter Brown (2015), Small Near-Earth Asteroids as a Source of Meteorites.

Boslough M.B.E., Crawford D.A. (2008) Low-altitude airbursts and the impact threat. International Journal of Impact Engineering, 35, 1441–1448.

Bottke, W.F., Vokrouhlicky, D., Minton, D., Nesvorny, D., Morbidelli, A., Brasser, R., Simonson, B., 2011. The Late Heavy Bombardment. 42nd Lunar and Planetary Science Conference, Abstract # 2591.

Brown, P. (1999). The Leonid Meteor Shower: Historical Visual Observations. Icarus, 138:287-308.

Brown, P., Spalding, R.E., ReVelle, D.O., Tagliaferri, E., Worden, S.P. (1998): The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth. Nature 420, 294-296.

Brown P. G. and al, (2013a) A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. Nature 503, 238-241.

Canup RM. 2012 Forming a Moon with an Earth-like composition via a giant impact. Science 338, 1052–1055. (doi:10.1126/science.1226073)

Carr MH. 1981. The Surface of Mars. New Haven, CT: Yale Univ. Press. 232 pp.

Ceplecha Z. (1988) Earth's influx of different populations of sporadic meteoroids from photographic and television data. Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia, 39, 221-236.

Chambers, J. E. & Lissauer, J. J. (2002): A new dynamical model for the lunar Late Heavy Bombardment. Lunar Planet. Sci. Conf. XXXIII, abstr. 1093.

H. Chennaoui Aoudjehane, G. Avice, J.-A. Barrat, O. Boudouma, G. Chen, et al. (2012), Tissint Martian Meteorite: A Fresh Look at the Interior, Surface and Atmosphere of Mars, Science, 9 November 2012: Vol. 338 no. 6108 pp. 785-788. doi :10.1126/science.1224514.

Cooke, W. J. and Moser, D. E., 2012. The status of the NASA All Sky Fireball Network. WGN, Proceedings of IMC 2011, 9-12.

Cuk, M, Stewart, ST. 2012Making the Moon froma fast-spinning Earth: a giant impact followed by resonant despinning. Science 338, 1047–1052. (doi:10.1126/science.1225542)

Daubar I. J., McEwen A. S., Byrne S., Kennedy M. R., Ivanov B. (2013) The current martian cratering rate. Icarus, 225, 506-516.

Dunham, D. W. 1999, IAU Circ. 7320.

Dunham, D. W., et al. 2000, in Lunar and Planetary Science XXXI (Houston: Lunar Planet. Inst.), No. 1547.

D. W. Dunham, (2013).Solar System Research, Published in Russian in AstronomicheskiiVestnik, 2013, Vol. 47, No. 4, pp. 341–351.

Fairén A. G. and el, (2011) Meteorites at Meridiani Planum provide evidence for significant amounts of surface and near-surface water on early Mars. Meteoritics and Planetary Science, 46, 1832-1841.

Gault, D.E., 1974. Impact cratering. In: A Primer in Lunar Geology, 137-175.

Gomes, R., H. F. Levison, K. Tsiganis, and A. Morbidelli (2005) Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. Nature, v. 435, p. 466-469.

Halliday I., Blackwell A. T., and Griffin A. A. (1989b). The flux of meteorites on the earth's surface. Meteoritics, 24, 173-178.

Halliday I., Griffin A. A., Blackwell A. T. (1996) Detailed data for 259 fireballs from the Canadian camera network and inferences concerning the influx of large meteoroids. Meteoritics and Planetary Science, 31, 185-217.

Hartmann W. K. et al., eds. (1986) Origin of the Moon, pp. 781.

Hartmann, 1965 Icarus. 4, 207-213.

Hartmann, W. K., Ryder, G., Dones, L. & Grinspoon, D. in Origin of the Earth and Moon, 493−512 (Univ. Arizona Press, Tucson, 2000).

Harris & D'Abramo, "The population of near-Earth asteroids", Icarus 257 (2015) 302–312.

Hiesinger, H., Van der Bogert, C.H., Pasckert,J.H., Robinson,M.S., Klemm,K., Reiss, D., LROC Team,2010. NewCrater Size-Frequency Distribution Measurements for Copernicus Crater Based on Lunar Reconnaissance Orbiter Camera Images. Lunar and Planetary Science Conference XLI. Abstract 1533.

Holsapple, K. A., 1993. The scaling of impact processes in planetary sciences. In: Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 21, 333-373.

Hueso R. and el . (2013). Impact flux on Jupiter: From superbolides to large-scale collisions. Astronomy and Astrophysics, 560, id. A55, 1–14.

Ivanov, B.A. (2006).: Earth/Moon impact rate comparison: Searching constraints for lunar secondary/primary cratering proportion. Icarus 183, 504-507.

Jenniskens,P (1995). Meteor stream activity. 2: Meteor outbursts. A&A, 295:206-235.

Jenniskens P., 2006, Meteor Showers and their Parent Comets. Cambridge University Press.

Jenniskens P. and el, (2009). The impact and recovery of asteroid 2008 TC3. Nature, 458, 485-488.

Koeberl, C. Impact processes on the early Earth, Elements 2, 211-216 (2006).

Kring, D. A. & Cohen, B. A. (2002) . Cataclysmic bombardment throughout the inner Solar System 3.9−4.0 Ga. J. Geophys. Res. Planets 107(E2), 4−10.

Kronk, G.W, (1988). Meteor showers. A descriptive catalog. Hillside, N,J. : EnslowPublishersm.

M. Le Feuvre, M.A. Wieczorek, Nonuniform cratering of the terrestrial planets. Icarus 197, 291–306 (2008). doi:10.1016/j.icarus.2008.04.011.

M. Le Feuvre, M.A. Wieczorek, Nonuniform cratering of the Moon and a revised crater chronology of the inner Solar System. Icarus 214, 1–20 (2011). doi:10.1016/j.icarus.2011.03.010.

Levison, H. F. et al. Could the lunar "Late Heavy Bombardment" have been triggered by the formation of Uranus and Neptune? Icarus 151, 286−306 (2001).

J.M. Madiedo, J.L. Ortiz, J.M. Trigo-Rodrguez, N. Moral, J. Cabrera-Cano, A large lunar impact blast on september 11th 2013. Mon. Not. R. Astron. Soc. (2014) doi:10.1093/mnras/stu083.

S. Marchi, S. Mottola, G. Cremonese, M. Massironi, E. Martellato, A new chronology for the Moon and Mercury. Astron. J. 137, 4936–4948 (2009). doi:10.1088/0004-6256/137/6/4936.

M. Marinova, O. Aharonson & E.Asphaug, Mega-impact formation of the Mars hemispheric dichotomy. Nature (2008) doi:10.1038/nature07070.

Mason, J.W. (1995). The Leonids meteors and comets 55P/Tempel-Tuttle. Journal of British Astronomical Association, 105:219-235.

McNaught, R.H. and Asher, D.J.: 1999, WGN, Journal of the IMO 27, 85–102.

H. J. Melosh, New approaches to the Moon's isotopic crisis. Phil. Trans. R. Soc. A 2014 372, 20130168.

Mimoun, D., Wieczorek, M.A., Alkalai, L., Banerdt, W.B., Baratoux, D., Bougeret, J.L., Bouley, et al. :Farside explorer: unique science from a mission to the farside of the moon. Experimental Astronomy 33, 529-585 (2012).

Morbidelli, A., Petit, J.-M., Gladman, B. & Chambers, J. A plausible cause of the Late Heavy Bombardment. Meteorit. Planet. Sci. 36, 371−380 (2001).

Morbidelli A., Bottke W. F., Jr., Froeschlé C., Michel P. (2002) Origin and evolution of Near-Earth Objects. In Asteroids III (W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, and R. P. Binzel, eds.), pp. 409-422. The University of Arizona Press.

Morbidelli, A., H. F. Levison, K. Tsiganis, and R. Gomes (2005) Chaotic capture of Jupiter's Trojan asteroids in the early Solar System. Nature, v. 435, p. 462-465.

Neukum,G., 1983 .Meteoriten bombardement und Datierung planetarer. Univ. Munchen,. 186 pp.

Neukum, G., Ivanov, B.A., 1994. Crater size distributions and impact probabilites. In: Gehrels, T. (Ed.), Hazards due to Comets and Asteroids. University of Arizona Press, Tucson, AZ, pp. 359–416.

Neukum, G., Ivanov, B.A., Hartmann, W.K., 2001. Cratering records in the inner solar system in relation to the lunar reference system. Space Science Reviews 96, 55–87.

Neumann, G. A., Lemoine, F. G., Smith, D. E. & Zuber, M. T. Marscrust (2008): A crustal thickness inversion from recent MRO gravity solutions. Lunar Planet. Sci. Conf. 39, abstr. 2167.

G. A. Neumann, M. T. Zuber, M. A. Wieczorek et al : Lunar impact basins revealed by Gravity Recovery and Interior Laboratory measurements (2015). Science Advances Vol. 1, no. 9, e1500852/ DOI: 10.1126/sciadv.1500852.

J. Oberst, A. Christou, R. Suggs, D. Moser, I.J. Daubar, A.S. McEwen, M. Burchell, T. Kawamura, H. Hiesinger, K. Wunnemann, R. Wagner, M.S. Robinson, (2012). The present-day flux of large meteoroids on the lunar.

Ortiz, J. L., Sada, P. V., Bellot Rubio, L. R., Aceituno, F. J., Gutie´rrez, P. J., & Thiele, U. 2000, Nature, 405, 921.

Popova O. P. (2013) Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteoriterecovery, and characterization. Science 342, 1069-1073.

C. Quantin, N. Mangold, W.K. Hartmann, P. Allemand, Possible long-term decline in impact rates. 1. Martian geological data. Icarus 186, 1–10 (2007). doi:10.1016/j.icarus.2006.07.008.

Paul R. Renne, Courtney J. Sprain, Mark A. Richards, Stephen Self, Loÿc Vanderkluysen et Kanchan Pande, 2015 « State shift in Deccan volcanism at the Cretaceous-Paleogene boundary, possibly induced by impact », Science, 2 octobre, p. 76-78

Robinson, M. S., Boyd, A. K., Denevi, B. W., Lawrence, S. J., Moser, D. E., Povilaitis, R. Z., Stelling, R. W., Suggs, R. M., Thompson, S., and Wagner, R. V., 2014. New crater on the Moon and a field of secondaries. L P S. XLV., 2164.

Silber E. A., ReVelle D. O., Brown P. G., Edwards W. N. (2009) An estimate of the terrestrial influx of large meteoroids from infrasonic measurements. Journal of Geophysical Research, 114.

Smith DE, Zuber MT, Frey HV, Garvin JB, Head JW, et al. 2001. Mars Orbiter Laser Altimeter: Experiment summary after the first year of global mapping of Mars. J. Geophys. Res. 106:23689–722

Stuart, L.H., 1956. A photo-visual observation of an impact of a large meteorite on the Moon. Strolling Astron. 10, 42–43.

Stöffler D. and Ryder G. (2001) Space Sci. Rev. 96, 9-54.

Suggs R. M., Moser D. E., Cooke W. J. and Suggs R. J. (2014) the flux of kilogram-sized meteoroids from lunar impact monitoring. Icarus, 238, 23-36.

Tagle, R. (2005). LL-ordinary chondrite impact on the Moon: Results from the 3.9 Ga impact melt at the landing site of Apollo 17. Lunar Planet. Sci. Conf. XXXVI, abstr. 2008.

Tsiganis, K., Gomes, R., Morbidelli, A. & Levison, H. F. (2005) Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System. Nature doi: 10.1038/nature03539.

Vaubaillon J, 2003. Dynamique des météoroides dans le système solaire. Application à la prévision des pluies météoritiques en générale, et des léonides en particulier. Thèse de doctorat (IMCCE-Observatoire de Paris).

Vaubaillon, J.; Colas, F.; Jorda, L. 2005, A new method to predict meteor showers. II. Application to the Leonids, Astronomy and Astrophysics, Volume 439, Issue 2, August IV 2005, pp.761-770

Vasilyev N. V. (1998) The Tunguska Meteorite problem today. Planetary and Space Science,46, 129-150.

R.Watters, J. McGovern, and P. Irwin, 2007. Hemispheres Apart: The Crustal Dichotomy on Mars. Annu. Rev. Earth Planet. Sci.. 35:621–52

Weryk, R.J., Brown, P.G., Domokos, A., Edwards, W.N., Krzeminski, Z., Nudds, S H., Welch, D. L., 2008. The Southern Ontario All-sky Meteor Camera Network. Earth Moon Planets 102, 241-246.

Whipple, F. L. 1949, Astronomical Journal, 54, 179.

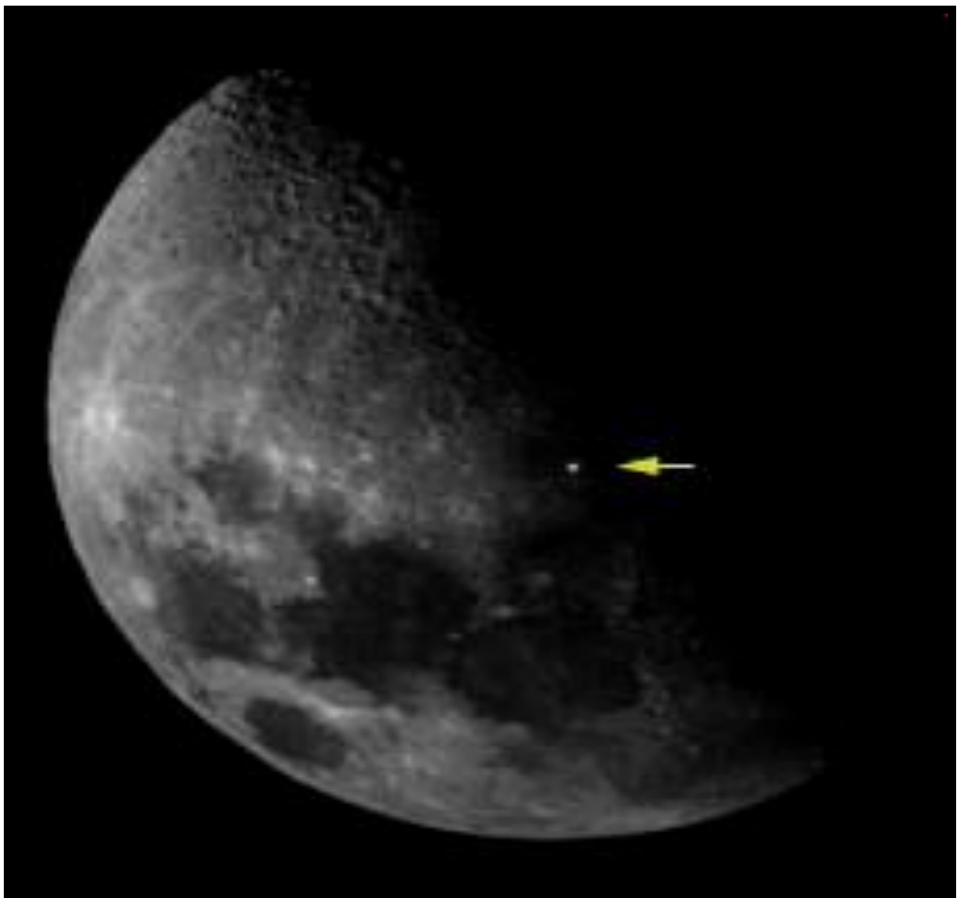
Wilhelms, D. E. & Squyres, S. W, (1984). The martian hemispheric dichotomy may be due to a giant impact. Nature 309, 138–140 .

Zappala, V., Cellino, A., Gladman, B. J., Manley, S. & Migliorini, F, (1998). Asteroid showers on Earth after family break-up events. Icarus 134, 176−179.

Zuber, M. T, (2001). The crust and mantle of Mars. Nature 412, 220–227.

CHAPITRE II

Généralités sur les flashs d'impacts lunaires



Contenu

Introduction 45
I. Historique des flashs lunaires 45
II. Intérêt scientifique des flashs lunaires 48
III. Paramètres de détection des flashs lunaires 65
Références 76

Introduction

Les météoroïdes impactant la Lune donnent lieu à une variété de phénomènes différents qui permettent leur détection. Il s'agit notamment des ondes sismiques, des améliorations transitoires de l'atmosphère lunaire mince, et des flashs lumineux. Un flash lunaire est un phénomène lumineux transitoire se produisant en réponse à un impact à haute vitesse d'un météoroïde sur la surface lunaire. Ces météoroïdes glacés, rocheux ou métalliques heurtent la Lune avec des vitesses allant de moins de 10 km/s à plus de 70 km/s. Une fraction de l'énergie cinétique transférée aux roches lunaires est convertie en rayonnement produisant un flash lumineux de courte durée (typiquement inférieure à 1 seconde). L'émission lumineuse résulte de la phase d'expansion et de refroidissement du plume généré lors de l'impact. Ce plume passe probablement par une étape pendant laquelle la phase plasma domine, puis on assiste ensuite au refroidissement d'un nuage de vapeur au sein duquel se condensent des particules liquides, qui vont ensuite se solidifier. Cette seconde phase est dominée par une émission thermique (émission de type corps noir) au sein d'un nuage suffisamment peu dense pour laisser passer le rayonnement ; les caractéristiques de l'émission variant avec la température du nuage.

Dans ce chapitre, et en premier lieu nous présenterons une brève histoire de détections des flashs. Nous présenterons après l'intérêt scientifique des observations des impacts sur la Lune : Quantification du flux d'impacts présent sur la surface lunaire. Nous présenterons aussi l'importance de ces observations au travers des différentes implications intervenant dans l'exploration lunaire, à savoir, la sismologie lunaire, l'étude de l'atmosphère lunaire, et la découverte des nouveaux cratères. Finalement, nous mettrons l'accent sur les contraintes observationnelles. En effet, certains facteurs limitent la visibilité de ces événements lumineux sur la partie sombre du disque lunaire.

I. Historique des flashs lunaires

I.1. Preuves des impacts lunaires

La possibilité d'observer les flashs d'impacts lunaires a été discutée il ya presque un siècle par Gordon, (1921) et les implications de ces observations sur l'existence d'une atmosphère lunaire ont été examinées par La Paz. (1938). Des tentatives pour détecter les flashs lunaires optiquement incluent le programme 'Lunar Meteor Search' d'ALSOP de 1955 jusqu'à 1965 (Westfall, 1997). Mais les capteurs utilisés à l'époque n'ont été pas assez rapides et sensibles pour détecter les flashs lunaires. En 1966, une autre tentative

d'observation des impacts lunaires durant l'activité des Léonides a donné des résultats encourageants mais non confirmés (Carpenter et al. 1967). La première preuve de l'existence d'impacts lunaires est venue de l'analyse des données sismiques des missions Apollo: environ un cinquième des événements sismiques lunaires enregistrés par l'expérience sismique Apollo entre les années 1969 et 1977 a été causé par des impacts des météoroïdes (Nakamura et al. 1981; Oberst & Nakamura, 1987a; 1987b; 1991). En 1972, l'astronaute Harrison Schmitt a observé visuellement un possible flash d'impact depuis l'espace sur en orbite lunaire au cours de la mission Apollo 17 pendant l'activité de la pluie des météores Géminides.

Melosh et al. (1993) a fait une évaluation théorique de la possibilité de détection des flashs en utilisant des photomètres et des télescopes terrestres, en considérant l'émission thermique du type corps noir associée au flash. Il a conclu que la technique basée sur les photomètres permettrait de détecter des flashs d'impacts de grands météoroïdes (environ 1 m), par l'utilisation d'un télescope de 1 mètre de diamètre. Parce que ces événements d'impacts sont très rares (causés par les impacteurs de 1 m de diamètre où plus), l'évaluation a été décourageante pour réussir l'observation. Néanmoins, le développement des CCD dans la fin des années 1990 a encouragé de nouveau la recherche de ces événements.

Les caméras CCD sont beaucoup plus sensibles que les photomètres, et une nouvelle analyse des seuils de détection a souligné que la détection des flashs serait possible même avec des télescopes de moyennes ouvertures équipés de capteurs CCD. Cela a été signalé par Oberst & Nikolova. 1998; Nemtchinov et al. 1998; Shuvalov et al. 1999; et Ortiz et al. 1999, qui ont fait des observations télescopiques avec des capteurs CCD en 1997 et 1998, mais ils ont été incapables de distinguer un véritable flash d'impact des différentes autres formes de bruit. Bien qu'aucune détection n'ait été obtenue, les seuils d'énergie de détectabilité d'un flash d'impact par observations CCD ont été présentés, il a été souligné qu'un petit télescope de 30 cm de diamètre peut facilement observer des flashs libérant des énergies lumineuses bien en dessous de 5×10^6 J dans le visible. Il a été également souligné que la tempête des Léonides 1999 offrirait une occasion unique pour enregistrer les flashs lunaires, due au flux considérablement important et aux conditions géométriques favorables de la rencontre.

Le 18 Novembre 1999, la Terre et la Lune traversaient à nouveau l'essaim météoritique des Léonides formé par les fragments de la comète 55P/Tempel-Tuttle, désintégrée en 1899. La Lune s'approchait alors à moins de 30000 km de l'essaim des Léonides. La comète 55P/Tempel-Tuttle a une période géocentrique de 33 ans, et la phase d'approche était très similaire à celle en 1966. Au moment de la rencontre du système Terre-Lune avec la poussière de la comète, les impacts sur la Lune ont été finalement observés depuis les Etats-

Unis (Dunham et al. 2000), l'Espagne (Ortiz et al. 2000; Bellot et al. 2000), et le Japon (Yanagisawa & Kisaichi. 2002). C'est la première fois qu'une détection optique d'impacts sur la Lune depuis la Terre fut réalisée sans ambiguïté.

Grâce aux Léonides de 1999, les scientifiques ont pu faire une estimation directe de l'efficacité lumineuse de ces impacts à hyper-vitesses (voir section 2.6) (Bellot et al. 2000), les masses des impacteurs détectés ont été estimées entre 120 g et 4.9 kg par Bellot et al. 2000, et entre 25 g et 3 kg par Cudnik el al, 2002 avec des diamètres compris entre 4 et 20 cm. Après 1999, il est devenu admis que les flashs lunaires peuvent être détectés depuis le sol par un télescope de taille moyenne équipé d'une caméra CCD rapide de haute sensibilité.

I.2. De 1999 … à nos jours

Après la tempête de 1999, c'est la pluie de météorites associée aux Léonides de 2001 qui a suscité un nouvel intérêt pour la détection de flashs lunaires. Le flux des météoroïdes prédit était élevé, bien que moins élevé que pour les Léonides de 1999, mais la Lune se trouverait dans une phase plus favorable que 1999, avec seulement une petite partie éclairé par le Soleil (premier ou deuxième croissant). Près de 50% de la section efficace de collision de l'essaim avec la Lune (définie par la les paramètres orbitaux des météoroïdes au moment de la rencontre avec la lune) était sur le coté sombre de l'hémisphère lunaire visible depuis la Terre. D'autres détections confirmées des impacts lunaires ont été effectivement observées durant les Léonides 2001 (Cudnik et al. 2002; Ortiz et al. 2002). Les observations des Léonides ont amélioré la modélisation des impacts à hyper-vitesses et ont donné un aperçu sur leurs propriétés thermiques (Artem'eva et al. 2001). En plus des Léonides, des observations fructueuses des impacts des Géminides, Lyrides, Perséides, et les Tauridesont été rapportées (Cooke et al. 2006, Yanagisawa et al. 2006 & 2008, Moser et al. 2010).

Des observations faites en dehors des périodes où les pluies de météores sont actives ont été également menées depuis l'Espagne. C'est dans le but d'observer les premiers flashs d'impacts sporadiques qu'Ortiz et al. (2006) ont rapporté les résultats d'observation de 34 nuits de surveillance faites pendant les années 2001,2002,2003 et 2004 depuis deux observatoires situés à Sierra Nevada et Grenade, une moyenne de 24 heures et 34 heures de données ont été respectivement enregistrées dans chaque observatoire. Cette surveillance télescopique simultanée faite entre 2001 et 2004 a permis de détecter trois flashs d'impacts sporadiques de magnitudes V : 7.09, 7.58 et 8.32. Malgré le petit nombre de détections, ces événements ont permis de produire une estimation préliminaire du flux d'impact dans le système Terre-Lune par observation des flashs lunaires. Cela à amener l'équipe espagnole à

établir une collaboration entre trois universités espagnoles pour installer et gérer un réseau de trois télescopes nommé MIDAS 'Moon Impacts Detection and Analysis System', ce projet a vu le jour en 2009, et les observations s'effectuent jusqu'à maintenant (Madiedo et al.2010, 2014).

Aux États-Unis, et après une première détection d'un flash lunaire corrélé avec la pluie des Taurides en Novembre 2005 par une équipe d'astronomes du « Meteoroid Environment Office » du NASA-Marshall Space Flight Center (Cooke et al. 2006), un équipement de deux télescopes automatisés ont été installés et commandés régulièrement depuis par cette équipe jusqu'à nos jours (Cook et al. 2007; Suggs et al. 2008, 2014). Les résultats principaux de ce réseaux seront présentés dans le 3ème chapitre.

D'autres observatoires sont en phase d'optimisation et validation de leurs configurions instrumentales, et nous attendons leurs premieres découvertes, à savoir : Observatoire de DLR Berlin-Allemagne (Margonis et al. 2015, Luther et al. 2013), Observatoire de Athéna-Grèce: (Bonanos et al. 2015 & 2016), et l'Observatoire de l'université de Kent-Royaume-Uni (Avdellidou 2015).

II. Intérêt scientifique des flashs lunaires

Comme vu dans le premier chapitre, la Lune a toujours été une source importante d'investigation en sciences planétaires. Les chutes à hyper-vitesses de météoroïdes sur la Lune, engendrent des tremblements lunaires, créent des cratères, font fondre les roches, et génèrent un nuage de plasma/vapeur. L'ensemble des processus produit un flash lumineux très bref, qui améliore temporairement l'atmosphère lunaire. Tous ces effets physiques sont maintenant techniquement observables (ex. : les missions Apollo, LROC, LADEE). La détection des flashs lunaires fournit: le temps et la position du site d'impact avec la meilleure précision, l'estimation de l'énergie d'impact, et la taille de l'impacteur (lorsque la vitesse est connue, ou qu'une hypothèse est faite sur celle-ci) ainsi que les diamètres des cratères produits (à partir des lois d'échelles de la cratérisation). Les futures explorations lunaires (de la croûte lunaire, étude de l'atmosphère lunaire, l'identification des nouveaux cratères) auront plus de valeur scientifique s'il est possible d'effectuer des déterminations indépendantes des différents paramètres physiques (mesurés ou déduits) des impacts.

II.1. Flux d'impact

La majorité des petits corps orbitent entre Mars et Jupiter, dans ce qu'on appelle la ceinture d'astéroïdes. Ces objets peuvent éventuellement changer d'orbite à cause de l'influence gravitationnelle des planètes et les collisions qui se déroulent à l'intérieur de la

ceinture. Ces astéroïdes **géo-croiseurs** entrent inlassablement dans l'environnement terrestre, ou plus largement, dans le système solaire interne.

Le flux d'impact et les méthodes principales qui permettent ces mesures ont été présentés dans le premier chapitre, ici nous nous concentrerons sur l'importance d'envisager la technique d'observation des flashs lunaire pour améliorer ces mesures. Nos résultats dans ce cadre seront présentés dans le chapitre 3.

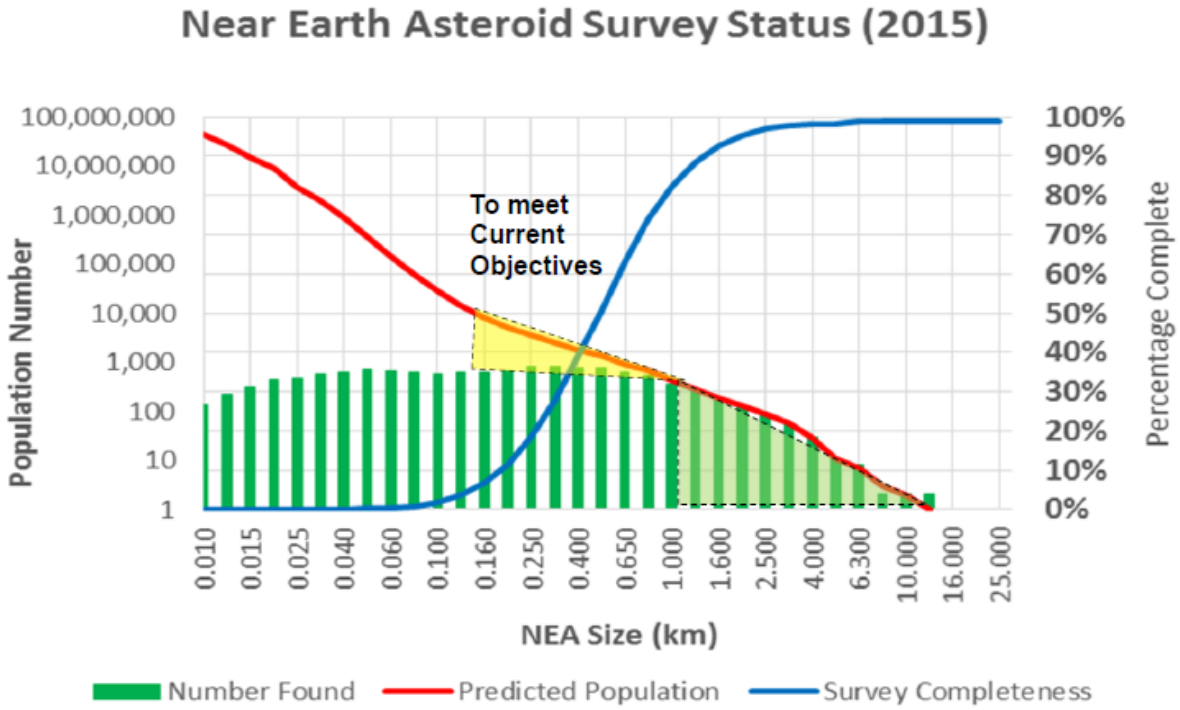


Figure II.1 : Etat de découverte des astéroïdes géocroiseurs jusqu'à 2015. La ligne rouge représente la population prédite (Harris & D'Abramo2015), la ligne bleue indique la complétude des observations, l'histogramme vert montre le nombre des découvertes par taille. L'objectif actuel des programmes de découverte se concentre sur la recherche de 90% de la population NEO supérieure à 140 mètres.

Plus de 90% des grands astéroïdes géo-croiseurs, de plus d'un kilomètre de diamètre, sont maintenant connus grâce aux observations télescopiques terrestres et spatiales. L'objectif actuel de ces programmes d'observation se concentre sur la découverte de 90% de la population des objets géo-croiseurs de taille supérieure à 140 mètres (voir figure II.1). À cette date, 60% des astéroïdes dont la taille est comprise entre 140 et 300 mètres n'ont pas encore été découverts (http://neo.jpl.nasa.gov/stats/; Johnson. 2015). Ces corps sont capables de causer des dégâts régionaux considérables s'ils pénètrent l'atmosphère terrestre au-dessus des zones terrestres peuplées, et peuvent même menacer une civilisation humaine à l'échelle d'un pays. Le flux d'impacteurs est surtout très mal connu si nous considérons les météoroïdes ayant des diamètres inférieurs à 140 m (Johnson 2015 ; Harris & D'Abramo 2015). Les

surfaces réfléchissantes de ces astéroïdes étant réduites, leur observation directe par les systèmes optiques est difficile. Ce qui illustre une limitation devant les techniques utilisées actuellement dans la découverte des petits astéroïdes. Toutefois, la mesure du flux de grands météoroïdes permet notamment de caractériser la population des petits astéroïdes dans le voisinage terrestre.

La connaissance du flux d'impact actuel est cruciale pour évaluer le risque encouru par l'humanité et la vie terrestre. Notre atmosphère terrestre constitue une protection contre les météoroïdes en ralentissant leurs vitesses significativement. Pourtant, les corps ayant des tailles supérieures à quelques mètres ne se vaporisent pas complètement dans l'atmosphère et peuvent parfois arriver jusqu'au sol avec une vitesse de collision considérable. Ces collisions provoquent des cratères d'impacts et des dégâts importants. Parfois, même si le corps n'est pas assez grand pour provoquer des effets dangereux directes sur la surface, il peut exploser dans la haute atmosphère avec la force d'une ou plusieurs bombes atomiques en générant une forte onde de choc qui se propage dans l'atmosphère, ce qui peut provoquer des effets nuisibles sur la surface, comme dans le cas d'événement de la Tunguska en Sibérie en 1908 (par exemple Vasilyev, 1998), Tcheliabinsk en 2013 (Brown et al, 2013a; Popova et al, 2013), et beaucoup d'autres événements non documentés. Les missions d'observations télescopiques ont seulement découvert environ 2500 astéroïdes géo-croiseurs avec des diamètres entre 10 à 30 mètres (comparable à l'astéroïde Tcheliabinsk)(http://neo.jpl.nasa.gov/stats/) parmi une population d'astéroïdes géo-croiseurs estimée autour de 2×10^7objets (Harris et al. 2013). Ce qui suggère un éventuel déséquilibre dans la population d'astéroïdes géo-croiseurs pour les objets de 10 à 50 mètres de diamètre, qui n'est pas encore apparent dans la population d'astéroïdes géo-croiseurs relativement grands (> à 100 m) découverts jusqu'à maintenant (Brown et al. 2013).

Notre atmosphère se comporte aussi comme un détecteur de petits corps qui entrent en collision avec la Terre. Les grands météoroïdes génèrent les bolides dans l'atmosphère. Leurs interactions sont principalement observables soit par (1) les caméras All-Sky et les caméras à grands champs de vision qui observent les émissions lumineuses, ou par (2) les détecteurs des infrasons mis en place sur des satellites artificiels militaires ou les récepteurs des ondes acoustiques basés au sol qui détectent les ondes de choc générés. Ces deux techniques ont contribué largement à l'estimation du flux d'impact actuel de petits astéroïdes (~10 m) inaccessibles par observation directe. Pourtant, les deux systèmes sont limités à des zones atmosphériques de surveillance locales.

Des zones de collecte très grandes sont nécessaires afin de fournir des statistiques raisonnables pour les calculs de flux présent des grands météoroïdes. Notre satellite naturel, la Lune peut être considéré comme un énorme détecteur de météoroïdes dans le voisinage terrestre. La méthode d'observation des flashs lunaires depuis le sol a l'avantage par rapport à l'observation des bolides terrestres d'utiliser une plus grande zone collectrice pouvant être couverte par un seul instrument d'observation (2 à 10 millions km^2). En effet la zone de collecte atmosphérique contrôlée par les stations de météores est comprise entre 3 et 10 milles km^2pour une camera All-Sky). Les zones collectrices offertes par notre satellite permettent d'observer un nombre très important de météoroïdes si les observations sont effectuées régulièrement et à long terme. La surveillance des flashs d'impacts lunaires pourrait être utilisée pour dériver un flux de météoroïdes dans une gamme de masse (30 g à quelques dizaines de kilogrammes) jusqu'à maintenant mal échantillonné par observation depuis la Terre avec les techniques classiques d'observation des bolides dans notre atmosphère.

La surveillance de la surface lunaire est motivée donc par la quantification du flux d'impact actuel sur la Lune, pour affiner le flux d'impact terrestre. La mesure du flux d'impact actuel par la technique d'observation des flashs lunaires peut aussi aider à caractériser le rôle des cratères primaires et des cratères secondaires dans la courbe de production de cratères d'impact, pour répondre aux récentes critiques qui ont reçu les méthodes populaires de comptage des cratères utilisées dans la datation des surfaces planétaires dans notre système.

Il a été montré que le taux de cratérisation varie avec la position, à la suite de la distribution non isotrope de paramètres orbitaux des impacteurs et des paramètres orbitaux de l'objet cible (Le Feuvre & Wieczorek, 2011). Des études sur les variations temporelles et spatiales des impacts lunaires pourraient être achevées par observation régulière et à long terme des flashs d'impacts. S'il existe des zones potentielles lunaires moins impactées par les météoroïdes, ceci peut être aussi vérifié. La contribution transitoire des pluies de météoroïdes sur le taux de production des cratères pourrait être évalué avec plus de précision. De plus, puisque la vitesse et l'angle d'impact de ces essaims de météoroïdes sont en général connus, la caractérisation de la distribution de masse et les tailles limites des météoroïdes à l'intérieur de chaque essaim de météoroïdes serait aussi possible si les observations sont réussies pendant plusieurs années.

II.2. Intérieur lunaire

Il ya 40 ans, les missions Apollo ont installé un réseau sismique de quatre stations sur la face visible de la Lune (voir figure II.2) qui ont fonctionnés de 1969 jusqu'en 1977.A ce jour, le réseau des sismogrammes d'Apollo reste le seul et l'unique réseau qui a fournit des données sismiques extraterrestres, et la majorité de nos connaissances sur la structure interne de la Lune est basée sur les données sismiques de ce réseau.

Les sismogrammes lunaires sont très différents de ceux obtenus sur Terre, en termes de source ainsi que de caractéristiques de propagation. Contrairement à la Terre, où l'activité sismique est principalement provoquée par la tectonique des plaques, la majorité des séismes lunaires sont provoqués par les forces des marées. Une autre source importante des ondes sismiques à l'intérieure de la Lune est fournie par les impacts météoritiques sur sa surface. En général, le bruit sismique sur la Lune est très faible, ce qui rend la détection sismique des impacts de météoroïdes (et artificiels) très efficace. Les données sismiques des expériences Apollo ont enregistré plus de 12.000 événements. Plus de 1700 de ces événements ont été causés par des impacts de météoroïdes ayant des masses comprises entre 500 g et 50 kg (Duennebier et al. 1975). Ces données ont été utilisées par la suite pour confirmer et proposer plusieurs pluies de météores (Oberst & Nakamura. 1987ab). L'analyse de quelques données sismiques en 1974 a établi que la pluie des Léonides a produit des signaux sismiques de grandes amplitudes, les masses d'impacteursont estimées dans la gamme de masse entre 0,1 et 1 kg (Oberst & Nakamura. 1991). En Juin 1975, un essaim de météoroïdes remarquablement fort a été détecté et corrélé avec l'essaim complexe des Taurides (Duennebier et al. 1975). Les impacts enregistrés sismiquement ont permis aussi de donner une nouvelle estimation du flux d'impact dans l'environnement lunaire (Oberst & Nakamura. 1989). En terme de structure lunaire interne, l'analyse d'un seul impact de météorite identifié sur la face cachée lunaire a suggéré l'existence possible d'un petit noyau partiellement fondu (Nakamura et al. 1974), mais aucun autre événement distant n'est venu confirmer cette observation (Nakamura et al. 1982; Loudin. 1979).

Les météoroïdes sismiquement détectés couvrent une large gamme de masse : les plus petits impacteurs « 500 g » sont détectés quand ils chutent près de l'une des stations sismiques, tandis que les grands impacteurs sont détectés partout sur toute la surface lunaire par les quatre stations du réseau (Oberst & Nakamura. 1987a). La pluparts de ces événements sont situés sur l'hémisphère ouest lunaire (figure II.2), ce biais est premièrement lié au fait que les petits événements ne sont détectables qu'à courte distance, et la station Apollo la plus

sensible est celle installée au centre de l'hémisphère lunaire ouest (Apollo 12). Une asymétrie d'impact entre les deux faces est aussi envisageable, et elle a été suggéré dans plusieurs travaux de recherche différents, par exemple à partir d'une estimation de la densité de cratères lunaires (Morota & Furumoto 2003; Werner & Medvedev. 2010) ainsi que les simulations numériques orbitales et dynamiques des objets géo-croiseurs dans l'environnement terrestre (NEO) (Gallant et al. 2009; Ito & Malhotra. 2010; Le Feuvre &Wieczorek. 2011). Une nouvelle analyse des données Apollo a aussi établie cette asymétrie (Kawamura et al. 2011).

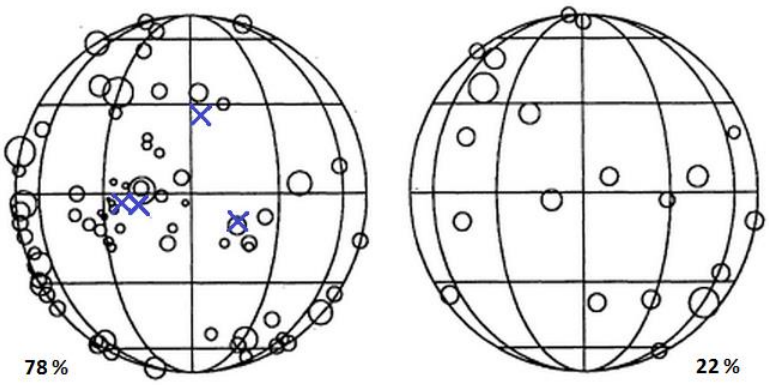


Figure II.2 : Distribution d'une sélection de 91impacts de grands météoroïdes sur la face avant lunaire (à gauche) et la face cachée (à droite). La taille des cercles est proportionnelle au logarithme de l'énergie d'impact. Les stations sismiques sont marquées d'une croix (Oberst & Nakamura 1989).

Malgré la qualité exceptionnelle des données Apollo pour cette époque, les impacts avec temps, positions et énergies bien connus ont été limités aux impacts artificiels provoqués par l'étage supérieur (3ème) de la fusée Saturn V (SIV-B) et l'étage d'ascension du LUNAR MODULE 45 (LM). Sinon, seulement 1% de ces événements ont été localisés avec une précision suffisante pour permettre une bonne inversion du temps de propagation des ondes sismiques en termes de structure de la croute lunaire, ce qui a empêché de sonder l'intérieur de la Lune avec une précision aussi bonne que celle obtenue sur Terre. Les données sismologiques fournies par les missions Apollo conduisent à proposer une épaisseur de la croûte de la face cachée (de 60-100 km) plus importante que l'épaisseur moyenne de la face visible (40 km), ce qui a été utilisé pour expliquer le décalage entre le centre de masse et le centre géométrique lunaire. Les ondes sismologiques disponibles n'ont pas pénétré à plus de 400 km de profondeur (à vérifier), et n'ont pas permis de caractériser le noyau. Plusieurs questions fondamentales concernant la structure interne de la Lune restent ouvertes et attendent les prochains programmes internationaux d'exploration lunaire (y compris NASA/ILN, JAXA/SELENE2, RKA/LUNARGLOB et d'autres projet de l'ESA, et projets indiens et chinois), parmi ces questions, on peut citer : Quelle est la variabilité de l'épaisseur

de la croûte lunaire? Quelle est la composition du manteau profond? Quelles sont la taille et la composition du noyau de la Lune? Est ce que la Lune possède un noyau interne solide ou partiellement fondu? Existent-ils des discontinuités sismiques dans le manteau? Et comment sont-elles liées à la cristallisation de l'océan de magma lunaire? Les questions de premier ordre sont schématisées dans la figure II.3.

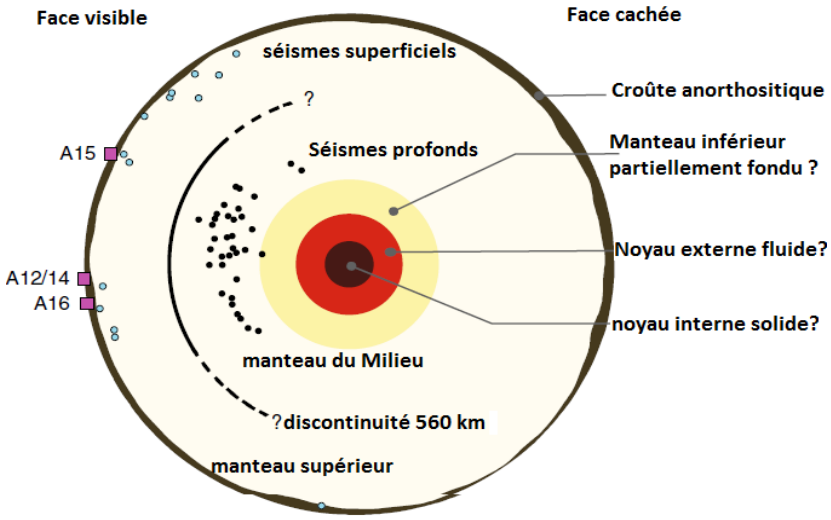


Figure II.3 : Schéma (à l'échelle) de la structure intérieure de la Lune. Les stations sismiques Apollo sont représentées par les carrées. En cercles bleus : les séismes lunaires peu profonds. Les régions profondes des tremblements lunaires périodiquement activés par les marées de la Terre sont schématisées par les cercles noirs. Les variations supposées de l'épaisseur de la croûte, et une éventuelle discontinuité à 500 km en dessous de la surface. La structure en dessous de la région profonde des tremblements lunaire est contrainte seulement par des moyens indirects (modifié à partir de Wieczorek et al. 2006).

Une mauvaise localisation (spatiale et temporelle) des impacts empêche toute correction de l'amplitude de signal des effets de propagation. Malgré les améliorations technologiques des sismographes depuis les années 1970, les futures missions (ILN-NASA: 2018 / SELENE II -JAXA : 2017 / Lunette-NASA: 2018) consacrées à l'exploration géophysique de la Lune seront confrontées aux difficultés similaires. La surveillance simultanée à partir du sol de ces impacts ouvre la possibilité de fournir la position et le temps de la source sismique de manière indépendante et précise, ainsi que l'estimation de l'énergie d'impact (à partir de l'estimation de l'énergie lumineuse et de l'efficacité de conversation de l'énergie d'impact en énergie lumineuse). Ces paramètres représentent une part importante du catalogue d'événements sismiques, et peuvent être utilisés pour améliorer notre connaissance sur la structure de la croûte lunaire (Chenet et al. 2006; Yamada et al. 2011). L'observation des flashs lunaires est motivée dans le contexte des projets avec les futurs réseaux sismologiques lunaires (Lognonné et al. 2009; Ait Moulay Larbi et al. 2015). Les futures missions séismologiques

lunaires ne seront pas limitées aux quelques impacts artificiels pour contraindre l'intérieure lunaire. L'emplacement et le temps des impacts naturels sur la face visible seront facilement fournis par observation des flashs. Toutefois, un impact artificiel provoqué (énergie connue) dans un même endroit qu'un flash observé sera très utile si les deux sont détectés sismiquement et visuellement. Cela permettra de mieux calibrer à la fois les mesures sismiques et photométriques, et d'évaluer certains paramètres physiques impliqués dans les calculs.

II.3. Identification des nouveaux cratères sur la lune

Nous avons vu dans le premier chapitre que les cratères des surfaces planétaires et satellitaires représentent un enregistrement permanent des impacts depuis la formation du système solaire. Ce processus géologique a permis de tracer la chronologie du flux d'impact sur la Lune, la Terre, et par extrapolation sur les corps solides du système solaire interne. Six missions 'Apollo' et trois missions 'Luna' ont permis le retour de plus de 380 kilogrammes des échantillons lunaires. Les âges radiométriques ont été déterminés pour 11 sites d'atterrissage par des méthodes de datations isotopiques (Stöffler & Ryder. 2001). La densité de cratères sur les terrains lunaires de différents âges a été utilisée pour étudier l'évolution temporelle du flux d'impacteurs dans le système Terre-Lune. Les images utilisées pour évaluer la densité des cratères et tracer la chronologie proviennent des « Apollo mapping cameras » et de « Lunar Orbiter ». Les modèles de la chronologie par densité de cratères ont été basés sur la taille des cratères observés (diamètre de référence > 1 km) (Neukum. 1983; Neukum & Ivanov. 1994; Neukum et al. 2001; Hiesinger et al. 2010).

Durant ces dernières années, et grâce aux cameras à bord des engins spatiaux récemment lancés en orbite autour de Mars et la Lune, l'imagerie des surfaces est devenue de plus en plus précise, donnant accès à la densité des cratères qui ont des diamètres aussi petits que 10 m, ce qui permet d'extrapoler et tester la fiabilité de la chronologie lunaire faite pour les cratères de diamètres >à 1 km. Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) a commencé à couvrir la surface de la Lune systématiquement depuis l'été 2009, et ce dans l'objectif d'acquérir un ensemble de données d'images pour faciliter les futures explorations. LRO fournit une variété des bases cartographiques qui permettent de construire la topographie Lunaire: Les images de LOLA 'Lunar Orbiter Laser Altimeter' sont utilisées pour achever une carte topographique lunaire globale et précise. Elles ont permis de créer le premier catalogue complet des grands cratères lunaires (D≥20 km) (Smith et al.2010).LRO comprend aussi une

paire de cameras Narrow-Angle (NAC ~ 0,5 m/pixel) et une camera Wide-Angle (WAC ~60 m/pixel).

L'identification des nouveaux cratères fournit une mesure du flux d'impact actuel, qui pourrait être utilisée pour calibrer les fonctions de production basées sur le comptage de cratères applicables sur les terrains très jeunes où les petits cratères dominent. La recherche des nouveaux cratères sur la surface lunaire est devenue possible avec les images fournies par LROC (Lunar Reconnaissance Orbiter Camera). Cela peut être effectué en comparant les images de LROC avec celles prises par ''Apollo mapping cameras'' il ya 40 ans, ou bien par comparaison des images LROC entre elles.

En comparant les images de LROC avec les images Apollo, la découverte de cratères d'impacts frais qui se sont formés au cours des 40 années écoulées depuis Apollo est limitée par le nombre d'images qui répondent aux exigences de comparaison. Premièrement, la comparaison s'effectue sur une paire d'images suffisamment conformes couvrant presque la même zone lunaire, une géométrie d'éclairage similaire (faible angle incidence) est aussi préférée en effet dans ces cas; il suffit de souligner les différences d'albédo plutôt que la topographie (Daubar el al. 2011), ce qui est relativement plus facile parce que la différence d'albédo est significative si nous considérons les caractéristiques fraiches autour d'un nouveau cratère «éjectas lumineux et des raies étendues sur un régolite relativement sombre» (Wilhelms et al. 1987). Daubar el al. 2011 ont fait une recherche systématique sur une superficie de 5700 km^2 en comparant les images NAC de LROC avec celles prises par l'Apollo orbital Panoramic Camera. Après la sélection des paires (Apollo, LROC) convenables à la comparaison, ils déforment géométriquement les images Apollo en utilisant des points de contrôle sélectionnés manuellement dans le logiciel ISIS (Integrated Software for Imagers and Spectrometers, Anderson et al. 2004), pour se conformer à la géométrie des images LRO-NAC. Par la suite, tout nouveau changement de surface, ou cratère frais présent dans l'image de LROC est recherché manuellement et visuellement dans la zone correspondante de l'image Apollo. Comme résultats préliminaires, Daubar el al (2011) ont découvert cinq nouveaux cratères d'impacts qui ont été formés dans les 40 dernières années sur les 5700 km^2 balayés (voir exemple de figure II.4). D'autres candidats supplémentaires de nouveaux cratères n'ont pas pu être confirmés en raison des différentes conditions d'éclairage dans les images Apollo et LROC. Tous les cinq cratères sont plus petits que 10 mètres en diamètre, les implications de ces résultats sont discutées dans Oberst et al. (2012).

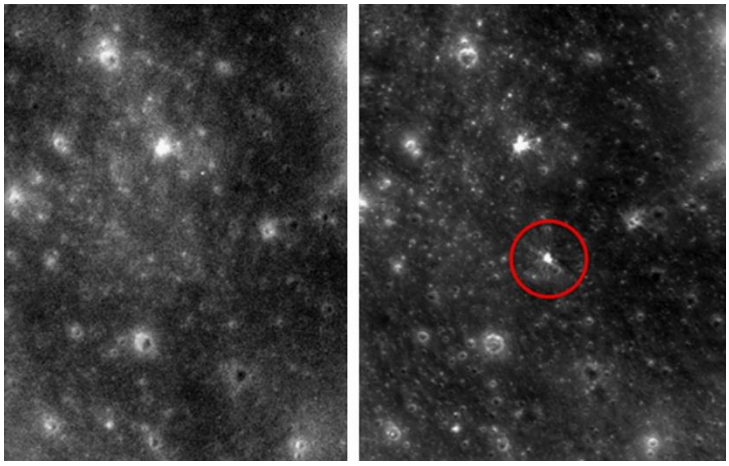


Figure II.4 : (à gauche) Image prise par ''Apollo 15 Panoramic Camera'' en Août 1971. (à droite) Image de LRO Narrow-Angle Camera prise en Septembre 2009. La géométrie de l'image Apollo a été ajustée pour être appropriée à l'image de LROC. Un nouveau cratère identifié sur l'image de LROC encerclé en rouge (Daubar et al. 2011). La zone a approximativement 800 m de largeur.

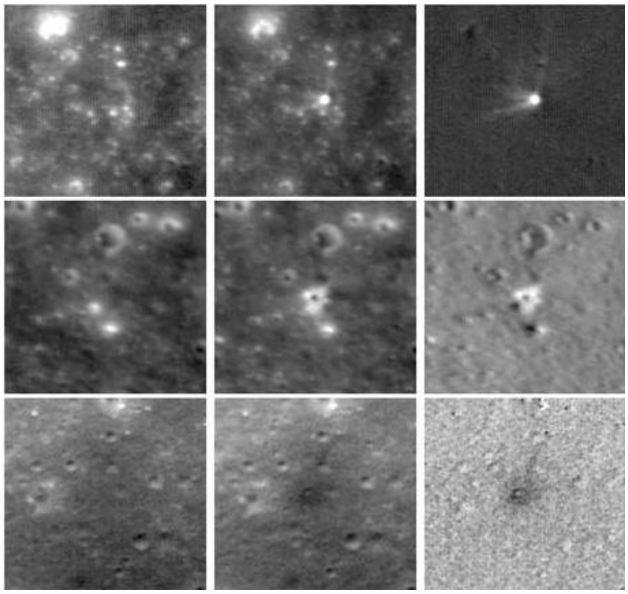


Figure II.5 : (à gauche) zoom d'images LROC avant-impact, (milieu) zoom d'images LROC après-impact, (à droite) images rapports après/avant. Notez dans les images en haut et en bas les raies visibles autour des cratères identifiés. En haut : M186498809, 15 Mar 2012; M1117140032, 5 Mar 2013, 150 m de large. En milieu : M106690695, 4 Sep2009; M1101009474, 30 Aug 2012; 165 m. En bas : M140556377, 1 Oct 2010;M1117160617, 5 Mar 2013; 75 m. Cette dernière caractéristique représente le type de changement LRC ''Low Reflectance change''.

La comparaison entre les images LROC elles-mêmes est relativement plus favorable par rapport aux comparaisons des images LROC-Apollo. Tout d'abord, les images à comparer ont des résolutions spatiales semblables, et ne nécessitent pas une déformation géométrique. De

plus, un grand nombre d'images sont prises soigneusement pour répondre aux exigences de comparaison en terme de luminance. La comparaison s'effectue sur les images dites « paires temporelles ». Ces paires d'images (avant, après) ont des géométries d'observation similaire et des éclairages identiques ce qui permet la recherche d'une série de changements superficiels, y compris les nouveaux cratères d'impacts, formés entre les moment où la première (avant-impact) et la deuxième image (après-impact) ont été acquises. Etant donné qu'une seule paire temporelle peut contenir plus de 10^9 pixels, malgré les similarités qui existent entre les paires temporelles de LROC, le balayage manuel d'un grand nombre de paires reste difficile.

Toutefois, Thompson et al. (2014) ont balayé manuellement 138 paires d'images. La technique consiste à effectuer une recherche visuelle sur le rapport des images avant et après de chaque paire (voir figure II.5).Ils ont identifié 657 changements superficiels (taches, raies, et cratères) sur une superficie de 27.000 km^2. Parmi ces changements, 19 nouveaux cratères ont été repérer. Le flux d'impact déterminé par cette étude a été estimé autour de~100 impacts/km^2/an.

Thompson et al. (2014) ont considérés que toute caractéristique HRC ''High Reflectance Change'' (alignements de taches ou cratère résolu) représente un événement d'impact primaire et unique, en effet, les indicateurs de direction (des alignements linéaires de taches, des taches allongées) peuvent pointer vers un cratère. Cependant, cette approche peut introduire un grand biais, y compris les effets des cratères secondaires. Il a été signalé que la majorité des nouveaux points lumineux ou sombres résolus dans les images LROC pourraient être des impacts secondaires (Robinson et al.2013). Le défi de l'ensemble de données LROC est de distinguer les cratères primaires des cratères secondaires (McEwen et al. 2015).

Jusqu'au 1er janvier 2015, LROC a fait l'acquisition environ un million d'images NAC de terrains éclairés. A partir de cette base de données, près de 10.000 paires d'images (avant, après) ont été identifiées et sélectionnées. Ces paires d'images ont des décalages temporels allant de 176 à 1241 jours terrestres (à noter que LROC a commencé l'acquisition depuis 2009). Speyerer et al. (2015) ont développé un programme automatisé qui identifie les modifications suspectes dans chaque paire d'images NAC de LROC. Les changements déjà identifiés manuellement par Thompson S.D. et al. (2014) ont été utilisés comme base de références pour tester la fiabilité des algorithmes du programme automatique développé par Speyerer et al.(2015). Les 10.000 paires scannées ont révélé automatiquement 46.057 changements de surface sur 8.300 paires d'images, la vérification manuelle a confirmé que plus 56% des détections sont effectivement des changements superficiels. Malgré cette

deuxième étape semi-automatisée, le logiciel développé a réduit largement le temps et la charge du travail humain par un facteur de 200. Le scan automatique a donné lieu aux 225 nouveaux cratères d'impact résolus (voir figue II.7).

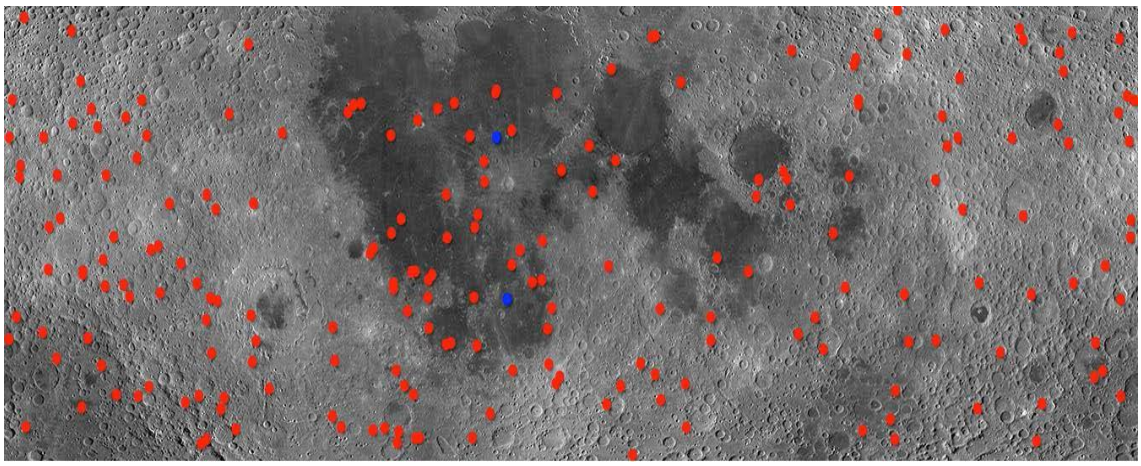


Figure II.6 : Localisations des nouveaux cratères d'impact superposées au fond cartographique lunaire LRO-Wide-Angel-Camera (intervalle de Lat: 55° N à 55° S ; intervalle de Long : -180° W à 180° E). Les points rouges indiquent l'emplacement des 225 nouveaux cratères d'impact découverts à ce jour avec des paires temporelles NAC et les points bleus indiquent l'emplacement des deux cratères associés aux flashs observés par Suggs et al. (2014) et Madiedo et al. (2014).

Ces cratères varient en diamètre de 1,5 m à 43 m et sont répartis sur toute la surface sur une variété de types de terrains (figure II.6 'points rouges'). En outre, les observations ciblées de LROC ont photographié les cratères d'impacts de 18 m et 34 m correspondants aux flashs lunaires observés respectivement le 17 Mars 2013 et 11 Septembre 2013 (figure II.6 :'Points bleus'). Speyerer et al.(2015) ont également identifié près de 26.000 autres modifications de surface qui ne présentent pas des bords de cratères visibles, mais seulement un changement de réflectance superficielle. Ceux-ci comprennent des changements de facteur de réflexion élevé (HRC), et des changements de réflectance faible (LRC), ainsi que des changements de réflectance mixtes.

Ce type de modification est considéré comme le résultat de petits événements primaires, pour lesquelles le diamètre du cratère d'impact résultant est inférieur à la limite de résolution des images, ou bien le résultat d'une perturbation secondaire causée par un événement primaire au voisinage du lieu d'identification. Dans plusieurs cas, ces changements de surface sont des indicateurs de directions claires pointant vers un cratère primaire plus brillant, ce qui confirme leur origine comme étant des cratères secondaires ou tout simplement des

modifications secondaires. Ce fut le cas lors de la recherche du cratère associé au flash lunaire de 17 Mars 2013 décrit dans Robinson et al. (2014).

La 17 mars 2013 le groupe du Marshall Space Flight Center centre de NASA a observé un flash lunaire pendant 1 seconde (Suggs el al. 2014). L'équipe de LROC a pu trouver quelques images NAC ''avant-impact'' prises de la zone autour du site d'impact avant la date d'observation du flash lumineux. La première série d'images ''après impact'' a été ciblée le 21 mai sur les coordonnées déclarés par le centre Marshall, et plusieurs petits (<6 m de diamètre) changements de luminosité de surface "taches" ont été trouvées après comparaison directe des images avant- et après-flash, mais aucun cratère résolu n'a été trouvé. Une deuxième série d'images a été acquise le 1er Juillet, et beaucoup plus de taches ont été trouvées. Cependant, trois caractéristiques de type 'raies' et plusieurs ''chaînes de taches'' ont été observées et présentaient une convergence vers un endroit commun à l'ouest des coordonnées du flash observé par le groupe de Marshall. Enfin, une troisième série d'images paires a été ciblée sur ce point de convergence le 28 Juillet (Robinson et al. 2014). L'analyse de cette troisième série d'images avec les images avant-flash a révélé un nouveau cratère de 18 m de diamètre (20,71 °N, 335,66 °E) et des taches associées. Le cratère du17 Mars est circulaire avec des raies asymétriques, à la fois dans la forme et les valeurs de réflectance (Fig. II.7). Les hautes-réflectances (+25% à +50%) des éjectas se prolongent au sud-ouest sur 10 à 20 m, une deuxième zone de faible-réflectance (-5% à -10%) déborde les éjectas haute-réflectance d'une manière plus symétrique, allant jusqu'à 50 m du cratère dans l'ouest-sud-ouest et à 80 m à l'est-nord-est. Une troisième zone de haute-réflectance difficile à percevoir (3% à 5%) déborde de la zone de faible-réflectance et présente une forme hémisphérique irrégulière allant jusqu'à des distances de 1 km, centrée sur le nord-est (Robinson et al. 2014). Les paramètres physiques du cratère d'impact du 17 Mars ont été évalués en utilisant les lois d'échelle des impacts proposés par Holsapple (1993). Différents impacts ont été modélisés sur une large gamme de vitesses d'impact (5-60 km/sec), en considérant le régolite lunaire comme surface cible et des densités d'impacteurs appropriées pour le fer-nickel (6 g/cm3 : météorites de fer), les comètes (1 g/cm3), et les chondrites (3,4 g/cm^3 : objets primitifs non différenciés). Le diamètre extérieur (18 m) et le diamètre interne du cratère (15 m) mesurés ont été utilisés comme paramètres d'entrée dans la modélisation pour générer des estimations de la taille et la masse du projectile ainsi que l'énergie libérée par le choc. Les propriétés physiques mesurées de ce cratère d'impact sont compatibles avec un projectile de diamètre entre 0,3-1,3 m et une masse comprise entre 33 à 566 kg, en fonction des hypothèses de

modélisation. En supposant une vitesse de 15 km/sec, l'impacteur aurait diffusé une énergie de 1,49 à 2,05 × 10^7 kJ selon sa densité (Robinson et al. 2014).

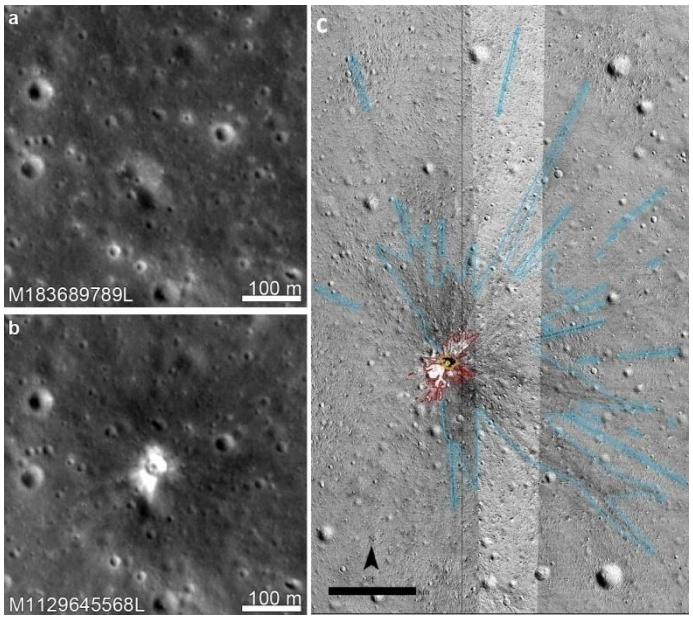


Figure II.7: A) ImageM183689789L NAC pré-impact de l'événement du 17 Mars. B) Image M1129645568L après-impact montrant le nouveau cratère formé de 18 m et les changements de régolithe associés. C) Ratio temporel (avant/après) : le contour orange délimite les plus proches éjectas de haute réflectance, la ligne rouge est la limite de faible éjectas de réflectance, le contour bleu montre la limite de la haute réflectance éjectas externe continue, la barre d'échelle est de 1000 mètres.

II.4 Atmosphère lunaire

Sur la Lune, il y a une très fine couche de gaz qui peut être appelée une atmosphère, cette atmosphère lunaire est 100 milliards de fois plus tenue que celle de la Terre. Techniquement, elle peut être considérée comme une exosphère lunaire. En effet, comme dans l'exosphère terrestre (la dernière couche de l'atmosphère), les atomes dans cette couche s'y comportent librement, certains s'échappent même dans l'espace à cause du vent solaire et de la faible gravité sur la surface lunaire.

Les premières détections de l'exosphère lunaire ont été faites sur la surface lunaire pendant le programme Apollo en utilisant trois expériences de jauge à cathode froide et le spectromètre de masse 'Lunar Atmosphere Composition Experiment' (Stern 2000). Il a été également constaté que l'atmosphère lunaire possède un composant actif composé de poussières, mis en avant par les observations de l'horizon lunaire après le coucher du soleil des orbiteurs Surveyor 5,6 et 7 (figure II.8) (Rennilson & Criswell, 1974). Ces observations ont été ensuite confirmées par les missions Apollo 15 et 17 qui ont été également interprétées comme la signature de la poussière à des hauteurs de plusieurs dizaines de kilomètres (McCoy & Criswell. 1974). Une possibilité que ces observations peuvent être dues à certaines émissions atmosphériques inconnues du sodium/potassium a été aussi considérée (Zook et al. 1995). Des augmentations significatives de sodium lunaire ont été effectivement détectées à l'occasion des Léonides 1997 et 1998 (Hunten et al. 1998; Verani et al. 1998; Wilson et al. 1999). Ces impacts ont été ainsi impliqués comme sources principales des changements transitoires dans les constituants de l'atmosphère lunaire ainsi que de la poussière lunaire. Les mécanismes possibles pour soulever la poussière à ces hautes altitudes ont été examinés en détails par Stubbs et al. (2005) et Grün et al. (2011). Il est maintenant clair que la Lune possède une atmosphère mince, et les changements transitoires sont principalement liées aux chutes des météoroïdes, la faible gravité sur le satellite ne peut pas conserver les espèces gazeuses pendant une longue période et un flux continu est nécessaire pour maintenir l'existence de cette atmosphère.

LADEE «Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer» était un orbiteur lunaire conçu pour caractériser la composition de l'atmosphère lunaire et étudier les processus qui contrôlent sa distribution et sa variabilité, comprenant les sources, les interactions de surface et la présence des poussières.

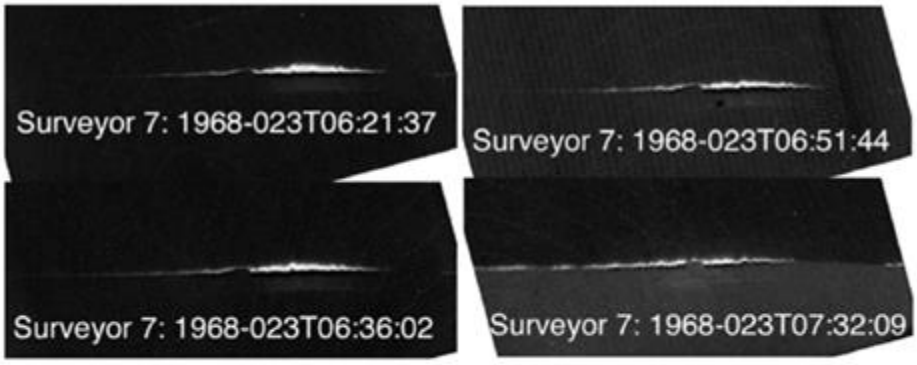


Figure II.8 : Les signatures d'un composant actif de poussière révélé par des images prises de l'horizon lunaire après coucher de soleil par l'orbiteur lunaire Surveyor 7 (crédit-NASA).

LADEE a piloté trois instruments scientifiques (figure II.9), un spectromètre de masse neutre, un spectromètre ultraviolet-visible, et l'expérience de la poussière LDEX, ainsi qu'un démonstrateur de la technologie des communications laser. La mission a été lancée le 7 Septembre 2013, 03:27 GMT; la mise en orbite lunaire a eu lieu le 6 Octobre 2013, 10:57 GMT; les observations scientifiques ont commencé le 10 Novembre 2013 et ont duré 100 jours terrestres seulement; la mission a terminé par l'impact de l'engin sur la face cachée de la lune le 18 Avril 2014, 04:30 GMT (NASA-LADEE Site Web).

Avant la phase de mesure, l'équipe de la mission LADEE suggérait que la mission pourrait fournir une excellente occasion d'une campagne coordonnée entre l'équipe de la mission et les observateurs des flashs lunaires, avec la possibilité de rechercher des corrélations entre les événements d'impacts qui seront observés et les changements qui seront détectés par les instruments scientifiques de LADEE.

Figure II.9 : l'orbiteur LADEE ''Masse: 383 kg; Dimensions: 2.37×1.85 m; Vitesse maximale: 5 760 km/h; Hauteur de l'orbite : 50 km; Vitesse en orbite : 1,6 km/s'' (crédit-NASA).

Dans ce cadre, le 5 Décembre 2013, le NASA's Solar System Exploration Research Virtual Institute (SSERVI) a mené une conférence en ligne ''LADEE Mission Workshop without Walls'' pour les parties intéressées afin de présenter les plans et procédures pour les observations scientifiques utiles. Cet atelier a réuni des membres de la mission LADEE, du NASA-Marshall center, de l'Association 'Lunar and Planetary Observers', et un certain nombre d'observateurs des flashs lunaires expérimentés, y compris l'auteur. L'atelier a été enregistré et archivé par SSERVI et peut être consulté par toute personne sur l'adresse URL suivante: http://connect.arc.nasa.gov/p4zpsnm6weh/.

Parmi les données recueillies par LADEE au cours de la phase scientifique de sa mission est celle de la présence de poussière lunaire en haute altitude, avec des changements dans sa concentration, qui ont été corrélés aux impacts de météoroïdes (Stubbs et al. 2014). Les observations spectrométrique UV et visible de LADEE ont dévoilé changement de la concentration exosphérique en Sodium qui coïncide avec une période d'activité météoritique, ainsi que d'une éventuelle évolution à long terme en raison de l'effet cumulatif du sodium produit par les impacts de météoroïdes (Colaprete et al. 2014). Les mesures du spectromètre de masse, semblent également y avoir un lien possible entre les flux de météoroïdes et la concentration de H_2O détectée dans l'exosphère lunaire (Benna et al. 2014).

En plus des conditions météorologiques nécessaires pour accomplir les observations, la détection des flashs lunaires depuis le sol est limitée à la portion sombre de l'hémisphère visible et est possible uniquement lorsque la phase lunaire est supérieure à 0.5. (Voir section suivante). Si nous prenons en considération ces exigences ainsi que de la durée de vie de LADEE (100 jours), on peut dire que la corrélation entre les détections terrestres et orbitales a été un grand défi. Bien que la Lune ait rencontré plusieurs pluies de météoroïdes lors de la mission scientifique LADEE, aucune de ces pluies n'a été active lors d'une phase lunaire particulièrement convenable aux observations terrestres.

Cependant, des observations ont été faites en dehors des pics d'activités des météoroïdes, et ont données lieu à quelques détections sporadiques. Le NASA Meteoroid Environment Office a observé '6 courts flashs confirmés'; Stefano Sposetti & Marco Iten (Italie, Suisse) '3 courts flashs confirmés'; George Varros (Maryland, USA) '3 flashs de très courte durée non confirmés'; Kingry (New Mexico) '1 flash confirmé'. Les analyses préliminaires n'ont pas encore pu mettre en évidence une corrélation entre l'un des événements d'impacts observés et les détections de LADEE. Cela ne surprend pas car les changements détectés par LADEE ne sont pas nécessairement situés dans les zones lunaires accessibles par observation terrestre. De plus, les campagnes d'observation sur Terre ne sont

pas coordonnées à 100 % avec les survols de LADEE à causes des phases lunaires limitées permettant les observations (Day & Cudnik. 2014). De ce fait, les flashs observés depuis la Terre ne sont pas survenus lorsque LADEE survolait les zones surveillées par les télescopes terrestres.

Les futures missions semblables à LADEE vont sûrement bénéficier des nouveaux réseaux d'observations des flashes. La coordination scientifique devra s'effectuer à l'avance, et les périodes de mesures devront être programmées pour des périodes plus longues que celle qui a été accordée à LADEE et synchronisées avec les grands essaims de météoroïdes observables depuis la Terre.

III. Paramètres de détection des flashs lunaires

III.1 Considérations géométriques

L'observation des flashs d'impacts sur la Lune dépend de quelques contraintes géométriques telles que, la phase lunaire et le lieu d'impact sur la Lune, ainsi que des contraintes techniques liées aux caractéristiques d'observation : optique du télescope, fenêtre spectrale, bruit de fond, résolution et sensibilité du capteur. Tout d'abord, il est nécessaire que les paramètres de rencontre permettent aux impacts de se produire sur l'hémisphère lunaire face à la Terre, et plus précisément sur la face nocturne lunaire vue depuis la Terre. Cette dernière contrainte provient du fait que l'intensité lumineuse du flash doit être plus élevée que celle de la surface de la Lune qui l'environne pour pouvoir être observé.

Il est possible de faire des prédictions d'observation des flashs lunaires, et évaluer la probabilité de détection des impacts à l'avance, mais seulement au moment d'activité d'une pluie de météoroïdes. En effet, les caractéristiques orbitales des grands essaims de météoroïdes sont maintenant connues. Les coordonnées équatoriales du radiant terrestre d'une pluie de météores (Point céleste d'incidence de l'essaim, définie par l'intersection de la trajectoire de l'essaim avec la Terre) peuvent se transformer en terme de coordonnées sélénographiques sur la Lune en utilisant des formules standards. Connaissant l'emplacement de la Terre dans son orbite par rapport au Soleil (la Longitude solaire), ainsi que la position de la Lune à l'égard de notre planète au moment de l'activité maximale des pluies, on peut déterminer le point d'intersection de la trajectoire de l'essaim avec la surface lunaire, et

vérifier si la géométrie de la rencontre va permettre aux impacts de se produire sur l'hémisphère lunaire face à la Terre ou non.

La détermination du radiant d'une pluie de météoroïdes sur la lune, permet de prévoir la section efficace lunaire des collisions observables, qui est la surface commune entre la partie sombre de l'hémisphère lunaire visible depuis la terre et l'hémisphère lunaire perpendiculaire à la direction de l'essaim des météoroïdes. La figure II.10 montre des illustrations de rencontres favorables prévues pour 2016.

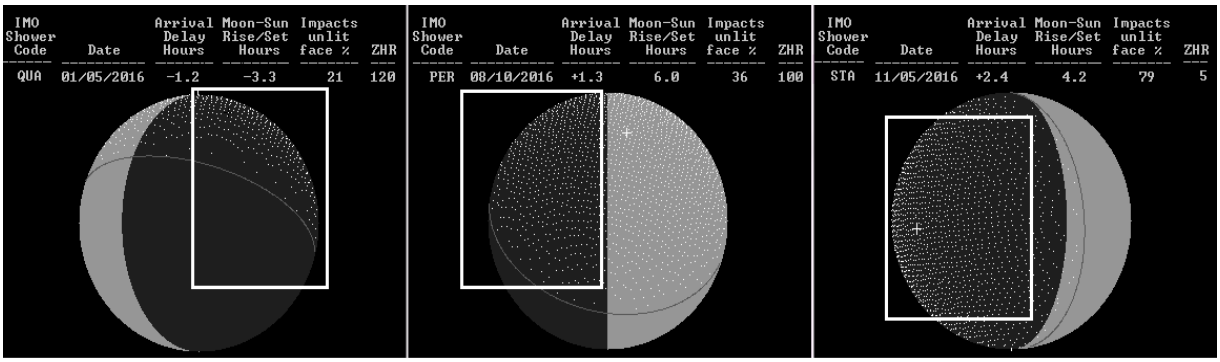


Figure II.10 : De gauche à droite : 21%, 36% et 79% de surfaces d'impacts sont observables pendant l'activité des Quadrantides, Perséides et Taurides 2016 respectivement. La surface d'impact (délimitée par les points) admet le radiant lunaire (indiqué avec un signe +) comme centre. Le champ de surveillance convenable à chaque pluie est montré par le triangle (Schémas procédées par le logiciel LunarScan (Gural 2007).

III.2 Considérations du signal sur bruit

Dans la partie sombre de l'hémisphère lunaire faisant face à la Terre; le signal de fond est dû principalement à la lumière cendrée (éclairage par la Terre) provoquée par la réflexion du rayonnement solaire par le coté jour de la Terre qui éclaire le coté nuit de la Lune. Ce signal de fond n'est pas considérablement gênant, mais est un inconvénient pour observer les plus petits flashs. Cependant la lumière cendrée est très utile pour localiser les impacts sur la surface lunaire. C'est la lumière diffusée par le côté jour de la Lune qui diminue le rapport signal/bruit et perturbe la qualité des images au fur à mesure que la phase lunaire augmente. Le cas le plus favorable à l'observation se produit donc au cours de la nouvelle Lune, mais la séparation angulaire entre le Soleil et la Lune est trop petite pour permettre des observations depuis la Terre, la Lune se lève et se couche presque en parallèle avec le Soleil, et la diffusion de la lumière solaire dans l'atmosphère terrestre rend l'observation du disque lunaire et les

flashs impossibles depuis la Terre (c'est possible pendant une éclipse totale, mais ceci est beaucoup moins fréquent).

Les conditions optimales d'observation ont lieu quelques jours avant ou après la nouvelle Lune. Pratiquement, les observations se déroulent quand la portion non éclairée domine au maximum (>50%) le disque lunaire, et c'est entre le dernier quartier lunaire et le premier quartier, en excluant bien sûr 2 nuits avant et après la nouvelle lune (figure II.11).

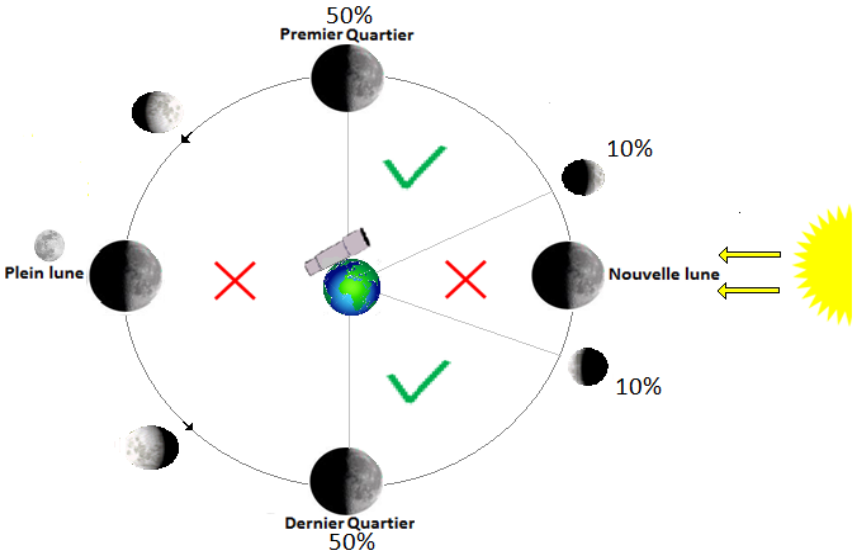


Figure II.11 : Les phases favorables aux observations offrent 8 à 10 nuits par mois, est c'est entre le dernier et le premier quartier. Deux nuits avant et après la nouvelle lune sont exclues, car le coucher et le lever de la lune sont synchronisés avec ceux du Soleil (en raison de la faible séparation angulaire). Au cours de l'autre moitié du mois, la partie éclairée domine le disque lunaire,empêche la visibilité des flashs due à la lumière diffusée par cette portion et augmente le bruit de fond.

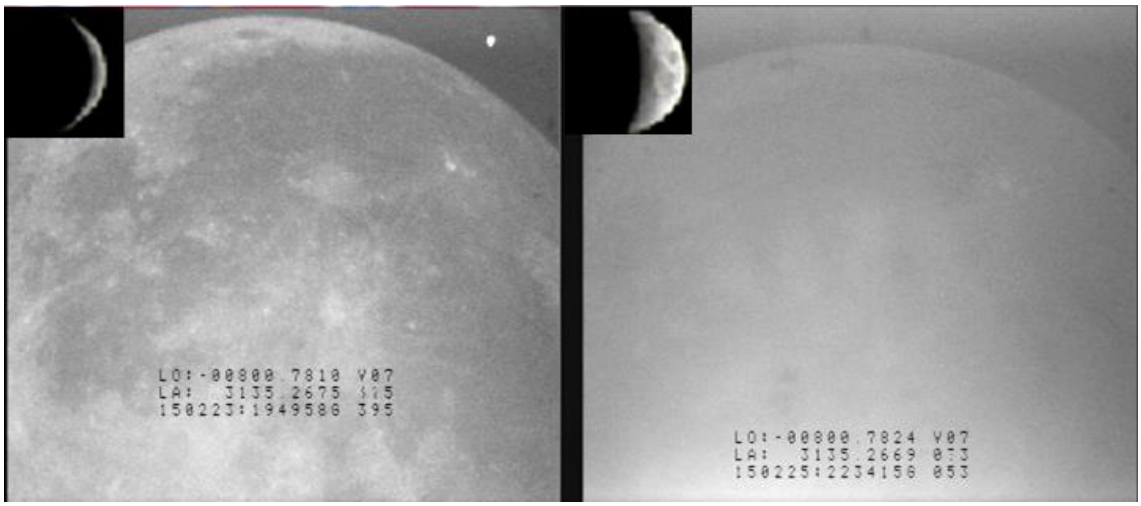


Figure II.12 : À gauche : Un champ avec une bonne qualité d'acquisition correspond à une observation au deuxième croissant (23/02/2015). À droite : Même champ pris deux nuit après (25/02/2015), notez la diminution la qualité des images.

Comme illustré sur la figure II.12, l'observation vers les phases juste avant où après la nouvelle lune se caractérise par une bonne qualité d'images, ce qui favorise la détection des impacts avec un bon rapport signal/bruit de fond. La surface de la portion nocturne est clairement apparente, car près de la nouvelle lune, la nuit lunaire se trouve très éclairée par le jour terrestre qui domine l'hémisphère terrestre faisant face à la lune (presque le maximum de lumière cendrée). L'inconvénient de ces phases (croissants) c'est que la lune se couche tôt après le soleil (début de mois lunaire) ou se lève tard vers le lever du soleil (fin de mois lunaire). La durée d'observation dont on peut profiter est alors minimale (45 min à 1h30).

Le bruit provoqué par la diffusion de la lumière à partir du côté jour de la Lune augmente avec la phase lunaire (voir figure II.12), et dépend aussi des conditions atmosphériques sur le site d'observation ainsi que l'optique du télescope. Pour des conditions normales d'observation, la luminosité de la face nocturne de la lune varie approximativement entre 10 et 16 mag/arcsec^2 (Pilar et al. 2007; Bouley et al. 2012), elle est maximale vers le premier ou le dernier quartier. Pour les phases proches des quartiers, les caractéristiques de la surface dans la partie nocturne deviennent presque invisibles, ce qui ne permet pas de bien localiser les impacts à partir de la morphologie de surface. L'avantage d'observer pendant ces phases est que la séparation angulaire entre le disque lunaire et le soleil est plus grande donnant lieu à des durées d'observation de 3 à 5 heures.

Dans le but de quantifier la visibilité du signal d'impact dans la nuit lunaire, Bouley et al. (2012) ont modélisé et examiné l'influence de deux sources de radiations à la surface de la lune,: l'émission thermique lunaire contrôlée par la température de surface et par l'émissivité du régolite, et la lumière cendrée correspondant à la réflexion (par la surface lunaire) de la lumière provenant de la surface terrestre éclairée par le soleil (coté jour) faisant face à la Lune. Le rayonnement thermique lunaire intrinsèque par unité de surface (W/m²/m) est donné par :

$$L_{Moon} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T_{Moon}}\right) - 1} \epsilon(\lambda)$$

Où 'T'est la température de surface (allant de 120 K à 150 K pendant la nuit lunaire), 'λ' est la longueur d'onde, 'ϵ(λ)' est l'émissivité du régolite lunaire en fonction de la longueur d'onde, 'c''h' et 'k_B' sont respectivement la vitesse de la lumière dans le vide, la constante de Planck et la constante de Boltzman. Le spectre de la contribution de la lumière cendrée par unité de surface (W/m2/m) est donné par:

$$L_{Earthshine} = \frac{A_{Earth}(\lambda)A_{Moon}(\lambda)E_{Sun}(\lambda)\Omega F\cos(i)}{\pi}$$

Où $'E_{sun}'$ est l'incidence rayonnante (la constante solaire 1 UA),A_{Earth} et A_{Moon} sont respectivement les albédos terrestre et lunaire (en fonction de la longueur d'onde, de la saison, et la région de la Terre vue de la lune). 'Ω' est l'angle solide du disque de la Terre vue de la lune (environ 8,6 sr), 'i' est l'angle d'incidence de la Terre à un endroit donné sur la surface lunaire,'F' est la fraction de la Terre éclairée par le soleil, vu de la Lune.

Le rayonnement de type corps noir associé à l'expansion d'un nuage composé de plusieurs phases (vapeurs, liquide, solide) dépend de la distribution de la température et la profondeur optique. Afin d'obtenir un premier aperçu de la contribution relative des différentes sources de rayonnement, un flash d'impact peut être approché par l'émission d'un corps noir associé à une température effective. Dans cet esprit, Bouley et al. (2012) définit une température effective $T_e$comme la température cinétique d'un corps noir qui émettrait une quantité de rayonnement par unité de surface égale à celle émise par le nuage associée à un impact par unité de surface.

Le spectre de flash (W/m2/m) a été approché par la loi de Planck du rayonnement d'un corps noir:

$$L_{impact}(\lambda,t) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T_e(t)}\right)-1}$$

Le spectre des flashs d'impacts et les autres sources de radiations sont représentés dans la Figure II.13 (Bouley et al. 2012). L'examen de ce spectre suggère que la lumière cendrée peut limiter la détection des flashes d'impacts dans le visible (entre 0,4 et 0,9 micromètre), tandis que les observations dans le proche-infrarouge et l'infrarouge peuvent être limitées par le bruit de fond de l'émission thermique lunaire.

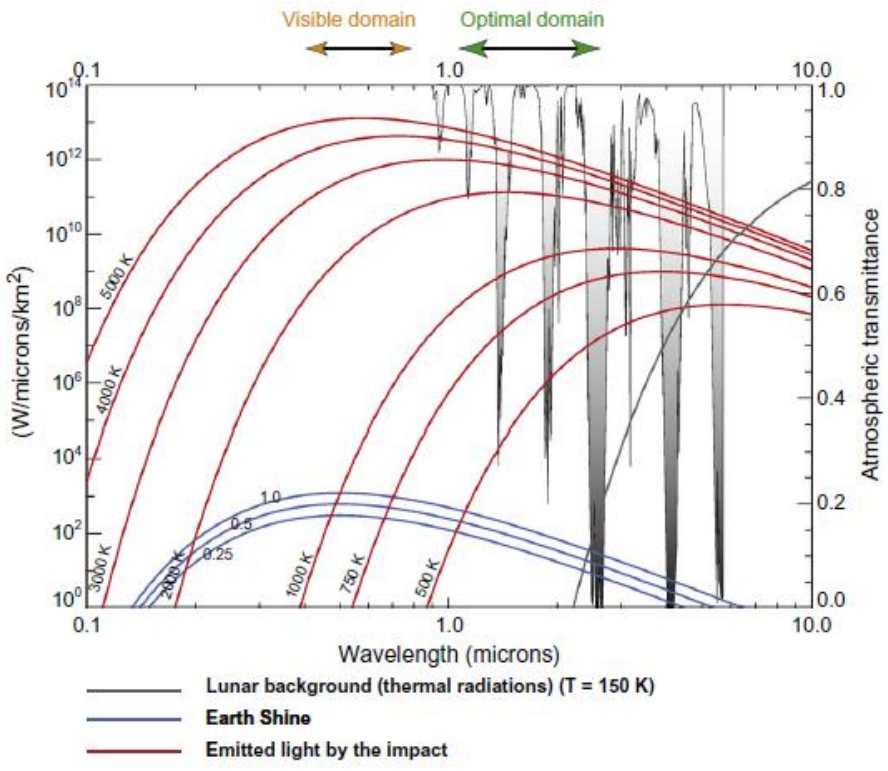


Figure II.13 : Spectre des différentes sources de rayonnement de la surface lunaire (lumière cendrée, émission thermique) par rapport à un rayonnement de corps noir à plusieurs températures. La transmission atmosphérique (axe vertical de gauche)est donnée sur l'axe vertical de droite.Le maximum de la lumière cendrée, quand le disque entier de la Terre est vu de la Lune, est calculé en premier (marqué avec 1,0). Lorsque seule une fraction du disque de la Terre éclairé est vu de la Lune l'intensité de la lumière cendrée est plus faible et les courbes sont données pour des valeurs moitié du maximum de la lumière cendrée(0,5) et le quart du maximum cendrée (0,25) (Bouley et al, (2012).

Le rapport du signal flash/signal lunaire pourrait être plus élevé dans le proche infrarouge que dans le visible, lorsque la température effective du « nuage » s'est abaissée, et que le nuage est optiquement transparent au rayonnement. Un autre avantage de l'infrarouge est que le rayonnement diffusé du côté jour de la Lune est plus faible que dans le visible. Le principal inconvénient des observations infrarouges est la variation rapide de la luminosité du ciel, qui montre souvent des différences significatives sur les échelles de temps de l'ordre de quelques minutes.

On peut augmenter le rapport signal sur bruit (SNR) de détection des flashs lunaires si nous utilisons des cameras CCD à temps d'intégration très court. Réduire le temps d'exposition engendre une diminution de bruit de fond, et puisque les flashs sont intenses, mais seulement pendant des intervalles à temps extrêmement courts, nous obtenons plus de détails sur l'évolution du flash au cours du temps, avec un meilleur rapport signal sur bruit, et

un signal qui n'est pas modifié, ce qui favorise aussi l'identification des petits flashs de faible luminance. Il est donc pratique de réduire le temps d'intégration autant que possible pour que le fond ne cache pas le signal provenant de l'impact, à cet égard, les caméras à capteurs CCD très rapides sont nécessaires pour augmenter la probabilité de détection (Bouley et al. 2012). Le deuxième avantage de ces caméras, c'est que le rendement quantique est généralement élevé dans les capteurs CCD, le grand nombre de pixels et la petite taille angulaire d'un seul pixel permet aussi aux matrices des CCD d'être plus sensibles.

Le type de capteur CCD, le télescope et d'autres facteurs techniques supplémentaires (champ de vision, résolution spatiale…) qui influencent la visibilité des flashs d'impacts lunaire vont être examinés en discutant le choix de nos équipements dans le chapitre III.

III.3 Efficacité lumineuse

L'efficacité lumineuse est un paramètre clé pour l'observation des impacts à grande vitesse. Elle désigne le rapport entre l'énergie lumineuse émise dans le domaine visible et l'énergie cinétique initiale de l'impacteur, autrement dit, elle définit la portion de l'énergie d'impact qui se transforme en rayonnement lumineux dans le visible, le signal qu'on observe depuis le sol avec les télescopes. Ce paramètre a été introduit initialement pour calculer les propriétés des météoroïdes à partir de leur comportement lumineux observé dans l'atmosphère terrestre (les météores) (Opik 1933, 1955). Les observations des grands météores dans l'atmosphère et leur modélisation donnent des efficacités lumineuses optiques dans la gamme de 10^{-2}- 8.10^{-2}. L'efficacité lumineuse dans le cas des météores dépend essentiellement des vitesses de l'objet avant sa rentrée atmosphérique (Halliday et al. 1996; Ceplecha & ReVelle. 2005).

Le phénomène lumineux associé aux impacts météoritiques sur la surface lunaire est considérablement différent de celui associé aux météores dans l'atmosphère terrestre. A l'instar des interactions atmosphériques qui offrent plus de temps au météoroïde pour dégager plus d'énergie cinétique sous forme de luminosité, les flashs lunaires sont de très courte durée. Immédiatement après l'impact, l'énergie cinétique de l'impacteur se trouve absorbée par les roches lunaires (formation de cratère, ondes de choc,...), ainsi une grande partie de l'énergie cinétique du météoroide est convertie en énergie cinétique des éjectas et gaz. Seulement une quantité de l'ordre de 10^{-3} (0.1 %) se transforme en énergie lumineuse dans le domaine du visible. Il a été constaté qu'il est crucial de préciser les estimations faites sur l'efficacité lumineuse, vu son rôle très important dans la détectabilité, l'analyse et

l'interprétation des flashs lunaires. En effet, seule la connaissance de ce coefficient permet d'estimer les énergies initiales d'impacts, les masses d'impacteurs, et par la suite le flux d'impact lunaire. L'efficacité lumineuse permet également de déterminer d'autres paramètres des impacteurs si les observations sont effectuées au cours d'activités des pluies des météores. En effet, la vitesse, l'angle d'incidence, ainsi que la composition chimique des grandes pluies de météores sont principalement connues à travers les observations atmosphériques.

Avant les premières observations des chutes de météoroïdes sur la Lune en 1999, la majorité des connaissances sur les impacts à hyper-vitesses comme ceux qui se produisent sur la Lune étaient principalement basées sur la modélisation et la simulation. En effet, il est impossible de reproduire en laboratoire des collisions à hyper-vitesses comme ceux des météoroïdes sur la lune'10 à 72 km/s'. Des impacts expérimentaux à des vitesses allant jusqu'à 6 km/sec (taille du projectile <1 cm) ont été effectuées en laboratoire, et ont indiqués que l'efficacité lumineuse optique est typiquement entre 10^{-5} et 10^{-4} (Eichhorn 1976; Kadono & Fujiwara. 1996; Nemtchinov et al. 1998a). Les simulations et les extrapolations de ces résultats ont montrées que pour des vitesses moyennes plus appropriées aux impacts des météoroïdes dans le système solaire (30 km/sec), ce coefficient est de l'ordre de 10^{-3} (Nemtchinov et al. 1998b).Ces modèles théoriques ont proposé que, pour une vitesse fixe, l'efficacité lumineuse peut dépendre également de la masse de l'impacteur, et les efficacités lumineuses pour les chocs obliques et verticaux sont pratiquement les mêmes (Nemtchinov et al. 1998a; Nemtchinov et al. 1998b).

Le travail théorique de Artemieva et al.(2000) indique que les efficacités optiques peuvent être aussi élevées que 10^{-3} pour des vitesses d'impacts de plusieurs dizaines de km/s (50,60,70), des valeurs comprises entre 1.10^{-3} et 2.10^{-3}sont généralement utilisées pour interpréter les observations des flashs lunaires (Artemieva et al. 2001). Si nous prenons donc une efficacité lumineuse de l'ordre de $1,5.10^{-3}$, un impacteur de masse 50g percutant la Lune avec une vitesse de 50 km/s va générer une énergie lumineuse de l'ordre de 9.4 10^4 J, en considérant que cette énergie est rayonnée d'une manière isotropique depuis la Lune durant un laps de temps de 100 ms, le flux lumineux qui serait reçu sur Terre est de l'ordre de 5.10^{-13} W/m^2. Un tel événement serait observable dans la partie sombre du disque lunaire avec une caméra CCD de haute sensibilité et un télescope de taille moyenne. De ce fait l'efficacité lumineuse des impacts à hyper-vitesses favorise la détectabilité des flashs lunaire depuis la terre si l'optimisation de la configuration instrumentale à été bien effectuée.

Sous certaines conditions, il est possible de produire des estimations suffisamment fiables de l'efficacité lumineuse des impacts à hyper-vitesses par analyse d'un certain nombre

de flashs lunaires observés et associés à une pluie de météores (Bellot et al. 2000). Le concept de l'efficacité lumineuse (η) a été appliqué aux flashs d'impacts observés lors de l'activité exceptionnelle des Léonides en 1999 (Bellot et al. 2000). L'idée de base est que le nombre cumulatif des impacts détectés durant l'observation à travers une surface de surveillance donnée correspondra au nombre d'impact prévu (avant l'observation) seulement lorsque la vraie efficacité lumineuse est utilisée pour calculer ce dernier. Le nombre d'impact sur la Lune dépend du flux météoritique et la surface lunaire surveillée est relativement perpendiculaire au radiant de l'essaim de météoroïdes. La distribution du flux cumulatif des météoroïdes de masse m et le nombre de météoroïdes qui impactent la lune au cours d'un intervalle de temps [t_1;t_2] sont données par les relations suivantes :

$$F(m) = F(m_0)\left(\frac{m}{m_0}\right)^{1-s} \qquad N = \int_{t_1}^{t_2} F(m,t)A\ dt$$

Où 'F (m)' représente le flux des particules dont la masse est supérieure à m, m_o est la masse d'un météoroïde produisant un météore terrestre de magnitude + 6,5. Et 's' l'indice de masse de la pluie des météoroïde. A est la surface lunaire surveillée inclus dans la section efficace de collision avec l'essaim. Les masses des météoroïdes impactant la Lune sont inconnues. En substituant m par '$2E/V^2$' dans la première équation, où 'V' la vitesse du météoroïde. Le flux cumulatif de particules en fonction de leur énergie cinétique 'E' peut être écrit comme :

$$F(E) = F(m_0)\left[\frac{2E}{m_0V^2}\right]^{1-s}$$

$E=E_L/\eta$,Où 'E_L' est l'énergie lumineuse, 'η' est l'efficacité lumineuse. On peut donc exprimer le nombre d'événements observables dans un intervalle de temps [t_1;t_2] ayant des énergies lumineuses au dessus d'un seuil d'énergie donné:

$$N(E_L) = \left[\frac{2E_L}{\eta m_0 V^2}\right]^{1-s} \int_{t_1}^{t_2} F(m_0,t)A\ dt$$

Où 'A' est la surface lunaire perpendiculaire à la direction du radiant dans le champ de 'N (E)', qui dépend de 'η'. Cette technique qui consiste à remonter à l'efficacité lumineuse en faisant correspondre le nombre d'impacts attendus sur la Lune à celui réellement observé a été appliquée la première fois aux Léonides lunaires en 1999, le résultat de cette application est celui présenté dans la figure II.14. Le nombre cumulatif des impacts observés en 1999 est cohérent avec une valeur d'efficacité lumineuse de 2.10^{-3}, qu'on considère actuellement comme valeur maximale de ce paramètre, vu que l'efficacité lumineuse dépend

essentiellement de la vitesse d'impact et les Léonides sont la famille de météoroïdes ayant la valeur maximale de vitesse d'impact (72 km/s) parmi les autres essaims de météoroïdes.

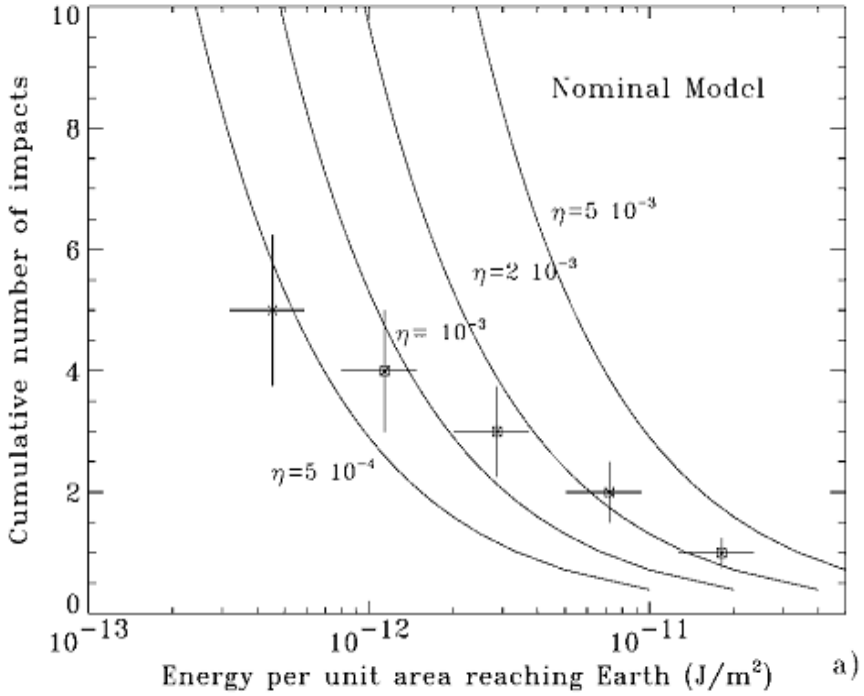


Figure II.14 : Comparaison entre le nombre cumulatif observé (carrés) et prévu (ligne) des impacts de Leonides en 1999 en fonction de l'énergie reçue sur Terre pour plusieurs efficacités lumineuses. Les données expérimentales sont plus adéquates avec la valeur de 2.10^{-3} (Bellot et al. 2000).

La même approche à été appliquée sur d'autres pluies de météoroïdes observés par NASA-MEO (Meteoroid environment office), à savoir : les Géminides 2006, les Lyrides 2007 et les Taurides 2008. Ces essaims de météoroï des ont des vitesses d'impacts dans le système terre-Lune de l'ordre de 35 km/s, 49 km/s et 27 km/s respectivement. Les ajustements des calculs aux données expérimentales sont présentés dans la figure II.15.

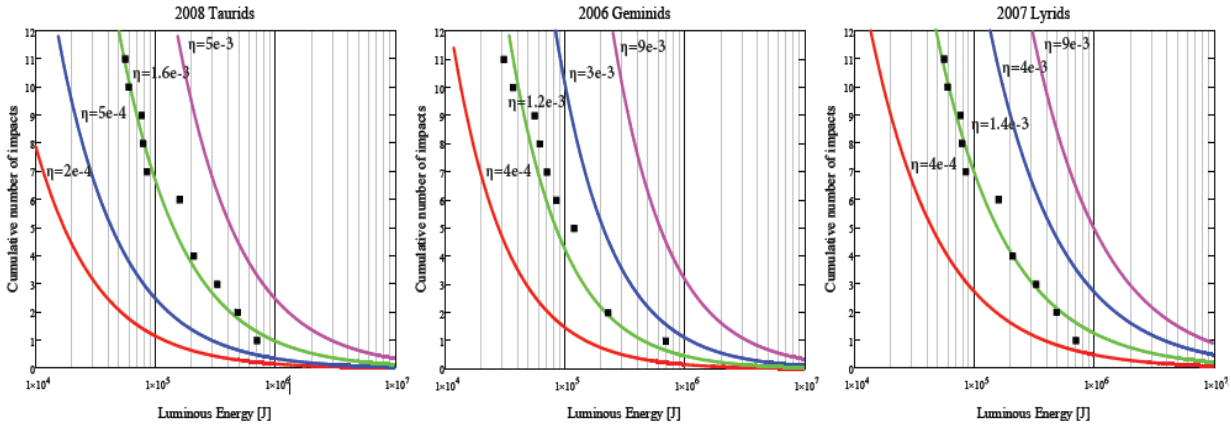


Figure II.15 : Comparaison entre le flux d'impact observé (carrés) et prévu (ligne pleine) des Taurides 2008, Géminides 2006, Lyrides 2007, en fonction de l'énergie reçue sur Terre pour plusieurs efficacités lumineuses. Les données expérimentales sont plus adéquates avec une valeur de $1{,}6.10^{-3}$ pour les Taurides, $1{,}2.10^{-3}$ pour les Géminides et $1{,}4.10^{-3}$ pour les Lyrides (Moser et al. 2010).

L'ensemble des efficacités lumineuses déduites pour ces différents essaims de météoroïdes, ainsi que les valeurs déduites des impacts expérimentaux en laboratoires ont été examinés par Swift et al. (2011). Un modèle d'efficacité lumineuse exponentielle à été développé dans le but qu'il fitte les impacts expérimentaux générés en laboratoires et ceux qui se sont produites sur la Lune (voir figure II.16). L'expression de l'efficacité lumineuse en fonction de la vitesse à été approximée par la relation: $\eta = 1.5\times10^{-3} exp(-\frac{9.3}{v^2})$, où v est donnée en km/s. Il a été signalé dans ce travail que l'efficacité lumineuse approchée par cette formule présente une erreur considérable aux petites vitesses (<15 km/s) et faible variation dans la gamme des vitesses entre 15 et 71 km/s.

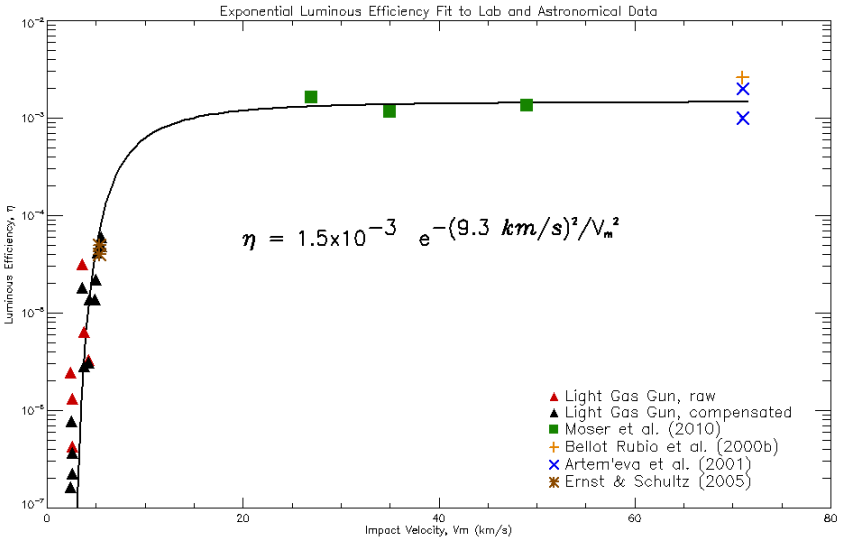


Figure II.16 : Modèle de l'efficacité lumineuse en fonction de la vitesse d'impact ajustée aux valeurs déduites à partir des impacts expérimentaux et ceux observés sur la Lune.

Références

Ait Moulay Larbi, M; Daassou, A; Baratoux, ;Bouley, S; Benkhaldoun, Z; Lazrek, M; Garcia, R; Colas, F. First Lunar Flashes Observed from Morocco (ILIAD Network): Implications for Lunar Seismology. Earth, Moon, and Planets,Volume 115,Issue 1-4, pp.1-21.

Anderson, J.A., et al.,2004. Modernization of the Integrated Software for Imagers and Spectrometers.Lunarand Planetary Science ConferenceXXXV.Houston,Texas, LPI,abs1986.

Artemieva N., Shuvalov V., and Trubetskaya I. (2000).“Lunar Leonid meteors — Numerical simulation”.In Lunar and Planetary Science Conference 31,Houston, Texas. Paper 1402.

Artemieva, N.A. Kosarev, I.B. Nemtchinov, I.V. Trubetskaya, I.A. Shuvalov, V.V. Light flashes caused by Leonid meteoroid impacts on the lunar surface. Sol. Syst. Res. 35, 177–180 (2001).

Avdellidou, C (2015). Observations of Lunar Impact flashes fromthe Beacon Observatory at University of Kent.Lunar Impact Workshop, ESA-ESTEC 2015.

Bellot Rubio, L.R., Ortiz, J.L., Sada, P.V., 2000a. Observation and interpretation of meteoroid impact flashes on the Moon. Earth Moon Planets 82/83, 575-598.

Benna et al. (2014) Fall American Geophysical Union metting, Abstarct # P21F-02.

Bonanos, A. NELIOTA NEO LUNAR IMPACT SURVEY. Lunar Impact Workshop, ESA-ESTEC 2015.

Bonanos, A. Z.; Xilouris, M.; Boumis, P.; Bellas-Velidis, I.; Maroussis, A.; Dapergolas, A.; Fytsilis, A.; Charmandaris, V.; Tsiganis, K.; Tsinganos, K. ESA's new NEO lunar impact monitoring project with the 1.2m telescope at the National Observatory of Athens. International Astronomical Union 2016/ 10.1017/S1743921315006973.

Bouley S., Baratoux D., Vaubaillon J., Mocquet A., Le Feuvre M., Colas F., Benkhaldoun Z., Daassou A., Sabil M., and Lognonné P. 2012. Power and duration of impact flashes on the Moon: Implication for the cause of radiation. Icarus 218: 115-124.

Brown P. and al, (2013a) A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors.Nature 503, 238-241.

Carpenter, J., Davidson, G., Franklin, F., Shepherd, O., 1967. Preliminary observations of meteor impacts on the lunar surface.NASA Final Report ASE-1543/NASA CR-85817, 34pp.

Ceplecha, Z., ReVelle, D.O., 2005. Fragmentation model of meteoroid motion, mass loss, and radiation in the atmosphere. Meteorit. Planet. Sci. 40 (1), 35–54.

Chenet, H., Lognonné, P., Wieczorek, M., Mizutani, H., 2006. Lateral variations of lunar crustal thickness from the Apollo seismic data set. Earth Planet. Sci. Lett.243, 1–14.

Colaprete et al. (2014) Fall American Geophysical Union Meeting, Abstarct # P21F-04.

Cooke, W.J., Suggs, R.M., Swift, W.R., 2006. A probable Taurid impact on the Moon. Lunar Planet. Sci. XXXVII. Abstract 1731.

Cooke, W.J., Suggs, R.M., Suggs, R.J., Swift, W.R., and Hollon, N.P. 2007. Rate andDistribution of Kilogram Lunar Impactors.Lunar and Planetary Science ConferenceXXXVIII, 1986.

Cudnik, B.M., Dunham, D.W., Palmer, D.M., Cook, A.C., Venable, R.J., Gural, P.S., 2002. Ground-based observations of high velocity impacts on the Moon's surface – The lunar Leonid phenomena of 1999 and 2001. Lunar Planet. Sci. XXXIII. Abstract 1329.

Daubar,I.J.,McEwen,A.S.,Burne,S.,Dundas,C.M.,Keske,A.L.,Amaya,G.L.,Kennedy,M., Robinson,M.S.,2011.New Craters on Mars and the Moon .In: Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference XLII.pp.2232–2233.

Day Brian H., Brian Cudnik (2014). Ground-Based Lunar Meteoroid Impact Observations and the LADEE Mission (SSERVI Exploration Science Forum 2014).

Duennebier, F, Dorman, J., Lammlein, D., Latham, G., Nakamura, Y.: 1975, Lunar and Planetary Science Conference VI, Houston, Texas, LPI, pp. 2417–2426.

Dunham, D.W., Cudnik, B., Palmer, D.M., Sada, P.V., Melosh, et al :, D., 2000. The first confirmed video-recordings of lunar meteor impacts. Lunar Planet. Sci. XXXI. Abstract 1547.

Eichhorn, G., 1976. Analysis of the hypervelocity impact process from impact flash measurements. Planet. Space Sci. 24, 771–781.

Gallant, J., B. Gladman, and M. Ćuk (2009), Current bombardment of theEarth-Moon system: Emphasis on cratering asymmetry, Icarus, 202,371–382, doi:10.1016/j.icarus.2009.03.025.

Gordon, J.W., 1921. Meteors on the Moon.Nature 107, 234-235.

Grün, E., Horanyi, M., &Sternovsky, Z. (2011), The lunar dust environment, Planetary and Space Science, 59, 1672–1680.

Gural, P (2007). Automated detection of lunar impact flashes.Meteoroid environments workshop.NASA MSFC, Huntsville, Alabama.

Harris, A. The value of enhanced NEO surveys. IAA-PDC13–05–09 (Planetary Defence Conference, IAA, 2013).

Harris &D'Abramo, "The population of near-Earth asteroids", Icarus 257 (2015) 302–312,

Halliday, I., Griffin, A.A., Blackwell, A.T., 1996. Detailed data for 259 fireballs fromCanadian Camera Network and inferences concerning the influx of largemeteoroids.Meteorit. Planet. Sci. 31, 185–217.

Hiesinger, H., Van der Bogert, C.H., Pasckert,J.H., Robinson,M.S., Klemm,K., Reiss, D., LROC Team,2010. NewCrater Size-Frequency Distribution Measurements for Copernicus Crater Based on Lunar Reconnaissance Orbiter Camera Images.Lunar and Planetary Science Conference XLI. Abstract 1533.

Holsapple, K. A., 1993. The scaling of impact processes in planetary sciences. In: Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 21, 333-373.

Hunten D., et al., 1998, Bull. Amer. Astron. Soc. 30, 1115

Ito, T., and R. Malhotra (2010), Asymmetric impacts of near-Earth asteroidson the Moon, Astron. Astrophys., 519, A63, doi:10.1051/0004-6361/200912901.

Jenniskens, P., 1994. Meteor stream activity: The annual streams. Astron. Astrophys. 287, 990-1013.

Kadono, T., Fujiwara, A., 1996.Observation of expanding vapor cloud generated byhypervelocity Impact. J. Geophys. Res. 101, 26097–26109.

Kawamura, T; Morota,TKobayashi,N and Tanaka, S. Cratering asymmetry on the Moon: New insight from the ApolloPassive Seismic Experiment. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 38, L15201, doi:10.1029/2011GL048047, 2011.

La Paz, L., 1938. The atmosphere of the Moon and lunar meteoritic erosion.Popular Astron. 46, 277-282.

Le Feuvre, M., and M. A. Wieczorek (2011), Nonuniform cratering of theMoon and a revised crater chronology of the inner solar system, Icarus,214, 1–20, doi:10.1016/j.icarus.2011.03.010.

Lognonné, P., Le Feuvre, M., Johnson, C.L., Weber, R.C., 2009. Moon meteoriticseismic hum: Steady state prediction. J. Geophys. Res. (Planets) 114 (E13),E12,003, doi:10.1029/2008JE003294.

Loudin, M. G. (1979). Structural-compositional Models of the Lunar Interior and Interpretation of Observed Estimates of the Moon's Fundamental Spheroidal Free Oscillations. M. S. Thesis, Pennsylvania State University, University Park.

Luther. R Margonis, A.; Oberst, J.; Sohl, F.; Flohrer, 2013. J.Observation of Lunar Impact Flashes with the SPOSH Camera: System Parameters and Expected Performance. id.EPSC2013-1049.

McCoy, J. E., & Criswell, D. R. 1974, Evidence for a high altitude distribution of lunar dust, Proc. Lunar Sci. Conf., 5th, 2991-3005.

A. McEwen I. Daubar, B. Ivanov, J. Oberst, R. Malhotr1, Y. JeongAhn, S. Byrne (2015). CURRENT IMPACT RATE ON EARTH, MOON, AND MARS; 46th Lunar and Planetary Science Conference : id :1854.

Madiedo J.M., Trigo-Rodriguez J.M., Ortiz J.L., Morales N., 2010,Advances in Astronomy, doi:10.1155/2010/167494.

J.M. Madiedo, J.L. Ortiz, J.M. Trigo-Rodrguez, N. Moral, J. Cabrera-Cano, A large lunar impact blast on september 11th 2013. Mon. Not. R. Astron. Soc. (2014) doi:10.1093/mnras/stu083.

Margonis, A. Oberst, J. Luther, R. Sohl, F. Lunar impact flash observationsat DLR Berlin; Lunar Impact Workshop, ESA-ESTEC 2015.

Melosh, H.J., Artemieva, N.A., Golub, A.P., *et al.* 1993, Remote Visual Detection of Impacts on the Lunar Surface, *Abstr. Lunar Planet. Sci. Conf. XXIV*, pp. 975–976.

Morota, T., and M. Furumoto (2003), Asymmetrical distribution of rayedcraters on the Moon, Earth Planet. Sci. Lett., 206, 315–323,doi:10.1016/S0012-821X(02)01111-1.

Moser, D.E., Suggs, R.M., Swift, W.R., Suggs, R.J., Cooke, W.J., Diekmann, A.M., Koehler, H.M., 2010. Luminous efficiency of hypervelocity meteoroid impacts on the Moon derived from the 2006 Geminids, 2007 Lyrids, and 2008 Taurids. In: Proceedings of the Meteoroids 2010 Conference, NASA CP-2011-216469, 142-154.

Nakamura, Y., G. Latham, D. Lammlein, M. Ewing, F. Duennebier, et J. Dorman (1974). Deep lunar interior inferred from recent seismic data. Geophys. Res. Lett. 1,137{140.

Nakamura, Y., G. V. Latham, H. J. Dorman, and J. E. Harris (1981), Passive seismic experiment long period event catalog, Tech. Rep. 118, Geophys, Univ. of Tex, Austin.

Nakamura, Y., G. V. Latham, et H. J. Dorman (1982). Apollo lunar seismic experiment final summary. J. Geophys. Res. 87, A117{A123.

Nemtchinov, I.V., Shuvalov, V.V., Artemieva, N.A., Ivanov, B.A., Kosarev, I.B., andTrubetskaya, I.A.: 1998a, Astr. Vest. 32, 116–132.

Nemtchinov, I.V., Shuvalov, V.V., Artemieva, N.A., Ivanov, B.A., Kosarev, I.B., Trubetskaya, I.A., 1998. Light impulse created by meteoroids impacting the Moon. Lunar Planet. Sci. XXIX. Abstract 1032.

Neukum,G., 1983 .Meteoriten bombardement und Datierung planetarer. Univ. Munchen,. 186 pp.

Neukum, G., Ivanov, B.A., Hartmann, W.K., 2001. Cratering records in the inner solar system in relation to the lunar reference system. Space Science Reviews 96, 55–87.

Neukum, G., Ivanov, B.A., 1994. Crater size distributions and impact probabilites: Hazards due to Comets and Asteroids. University of Arizona Press, Tucson, AZ, pp. 359–416.

Oberst, J., and Y. Nakamura (1987a), Lunar seismic impact clusters: Evidence for the presence of ''meteorite streams'', Lunar Planet. Sci., XVIII, Abstract 736.

Oberst, J., and Y. Nakamura (1987b), Distinct meteoroid families identified on the lunar seismograms, J. Geophys. Res., 92, 769–773.

Oberst, J., and Nakamura, Y. (1989).A New Estimate of the Meteoroid Impact Flux on the Moon. LPSC volume 20, page 802.

Oberst, J., and Y. Nakamura (1991), A search for clustering among the meteoroid impacts detected by the Apollo lunar seismic network, Icarus, 91, 315–325.

J. Oberst, A. Christou, R. Suggs, D. Moser, I.J. Daubar, A.S. McEwen, M. Burchell, T. Kawamura, H.Hiesinger, K. Wunnemann, R. Wagner, M.S. Robinson, (2012). The present-day flux of large meteoroids onthe lunar surface—a synthesis of models and observational techniques. Planet. Sp. Sci. 74, 179–193.

Öpik, E.J., 1933. Atomic Collisions and Radiation of Meteors (Harvard Reprint Ser.,100).

Öpik, E.J., 1955.Meteor radiation, ionization and atomic luminous efficiency. Proc.R. Soc. Lond. Ser. A, Math. Phys. Sci. 230 (1183), 463–501.

Ortiz, J.L., Aceituno, F.J., Aceituno, J., 1999. A search for meteoritic flashes on the Moon. A & A 343, L57.

Ortiz, J.L., Sada, P.V., Bellot Rubio, L.R., Aceituno, F.J., Aceituno, J., Gutiérrez, P.J., Thiele, U., 2000. Optical detection of meteoroidal impacts on the Moon.Nature 405, 921-923.

Ortiz, J.L., Quesada, J.A., Aceituno, J., Aceituno, F.J., Bellot Rubio, L.R., 2002. Observation and interpretation of Leonid impact flashes on the Moon in 2001. Astrophys. J. 576, 567-573.

Ortiz, J.L. Aceituno, F.J. Quesada, J.A. Aceituno, J. Fernandez, M. Santos-Sanz, P. Trigo-Rodrguez, J.M. Llorca, J. Martn-Torres, F.J. Montan es-Rodrguez, P. Palle, E. (2006). Detection of sporadic impact flashes on the Moon: implications for the luminous efficiency of hypervelocity impacts and derived terrestrial impact rates. Icarus 184, 319–326, doi:10.1016/j.icarus.2006.05.002.

Pilar Montanes and Enric Palle. MEASUREMENTS OF THE SURFACE BRIGHTNESS OF THE EARTH SHINE WITH APPLICATIONS TO CALIBRATE LUNAR FLASHES. The Astronomical Journal, 134:1145 – 1149, 2007

Popova O. P. and al, (2013) Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. Science 342, 1069-1073.

Rennilson, J. J., & Criswell, D. R., Surveyor observations of lunar horizon-glow, Moon, 10, 121-142, 1974.

M. S. Robinson, A. K. Boyd, B. W.Denevi, S. J. Lawrence, D. E. Moser, R. Z. Povilaitis, R. W. Stelling, R. M. Suggs, S. Thompson, R. V. Wagner.(2014) NEW CRATER ON THE MOON AND A FIELD OF SECONADRIES.LPSC abstract #2164.

Shuvalov, V.V., Artemieva, N.A., Kosarev, I.B., Nemtchinov, I.V., Trubetskaya, I.A., 1999. Small comets impacting the Moon. Lunar Planet. Sci. XXX. Abstract 1045.

Smith, D.E. et al. (2010), Space Sci.Rev., 150, 209-241.

E. J. Speyerer, M.S. Robinson, R. Z. Povilaitis, and R. V. Wagner. DYNAMIC MOON REVEALED WITH HIGH RESOLUTION TEMPORAL IMAGING. LPSC 2015 # 2325.

Stern, A. S. 1999, The lunar atmosphere: History, status, current problems, and context, Reviews of Geophysics, 37, 4, 453-491,.

Stöffler D. and Ryder G. (2001) Space Sci. Rev. 96, 9-54.

Stubbs, T. J., Vondrak, R. R., & Farrell, W. M. 2005, A dynamic fountain model for lunar dust, Lunar and Planetary Science Conference 36, 1899,.

Stubbs, T. J.; Glenar, D. A.; Wang, Y.; Sarantos, M.; Hermalyn, B.; Colaprete, A.; Wooden, D. H.; Benna, M.; Elphic, R. C. Influence of Meteoroid Streams on the Lunar Environment: Results from LADEE. American Geophysical Union, Fall Meeting 2014, #P23C-4003

Suggs, R.M., Cooke, W., Suggs, R., McNamara, H., Swift, W., Moser, D., and Diekmann, A. 2008.Flux of Kilogram-sized Meteoroids from Lunar ImpactMonitoring.Bulletin of the American Astronomical Society 40, 455.

Suggs R. M., Moser D. E., Cooke W. J. and Suggs R. J. (2014) the flux of kilogram-sized meteoroids from lunar impact monitoring. Icarus, 238, 23-36.

Swift, W.R. Moser, D.E. Suggs, R.M. Cooke, W.J. An exponential luminous efficiency mode for hypervelocity impact into lunar regolith. In Proceedings of the meteoroids 2010 conference, NASA CP-2011-216469 (2011), pp. 116–124.

S. D. Thompson, Z. R. Bowles, R.Z. Povilaitis, I. J. Daubar, M. S.Robinson (2014). RECENT IMPACTS ON THE MOON. LPSC 45. Abstract 2769.

Vasilyev N. V. (1998) The Tunguska Meteorite problem today. Planetary and Space Science,46, 129-150.

Verani S., et al., 1998, Planet. Space Sci. 46, 8, 1003-1006

Werner, S. C., and S. Medvedev (2010), The lunar rayed-crater population Characteristics of the spatial distribution and ray retention, Earth Planet.Sci. Lett., 295, 147–158, doi:10.1016/j.epsl.2010.03.036.

Westfall, J.E.: 1997, Worthy of Resurrection: Two past ALPO Lunar Projects., ALPO Monograph No 7.

Wieczorek, M.A., Jolliff, B.L., Khan, A., Pritchard, M.E., Weiss, B.P., Williams,et al.: The constitution and structure of the lunar interior. Rev. Mineral. Geochem. 60, 221–364 (2006)

Wilhelms, D.E.,Mc Cauley,J.F.,Trask,N.J.,1987,The geologic history of the moon. Washington, U.S.G.P.O., Denver,CO.

Wilson, J. K., Smith, S. M., Baumgardner, J., &Mendillo, M. 1999, Modeling an enhancement of the lunar sodium tail during the Leonid meteor shower of 1998, Geophysical Research Letters, 26, 12, 1645-1648,.

Yamada, R., Garcia, R.F., Lognonné, P., Le Feuvre, M., Calvet, M., Gagnepain-Beyniex, J., 2011. Optimisation of seismic network design: Application to a geophysical international lunar network. Planet. Space Sci. 59, 343–354.

Yanagisawa, M., Kisaichi, N., 2002.Lightcurves of 1999 Leonid impact flashes on the Moon. Icarus 159, 31-38.

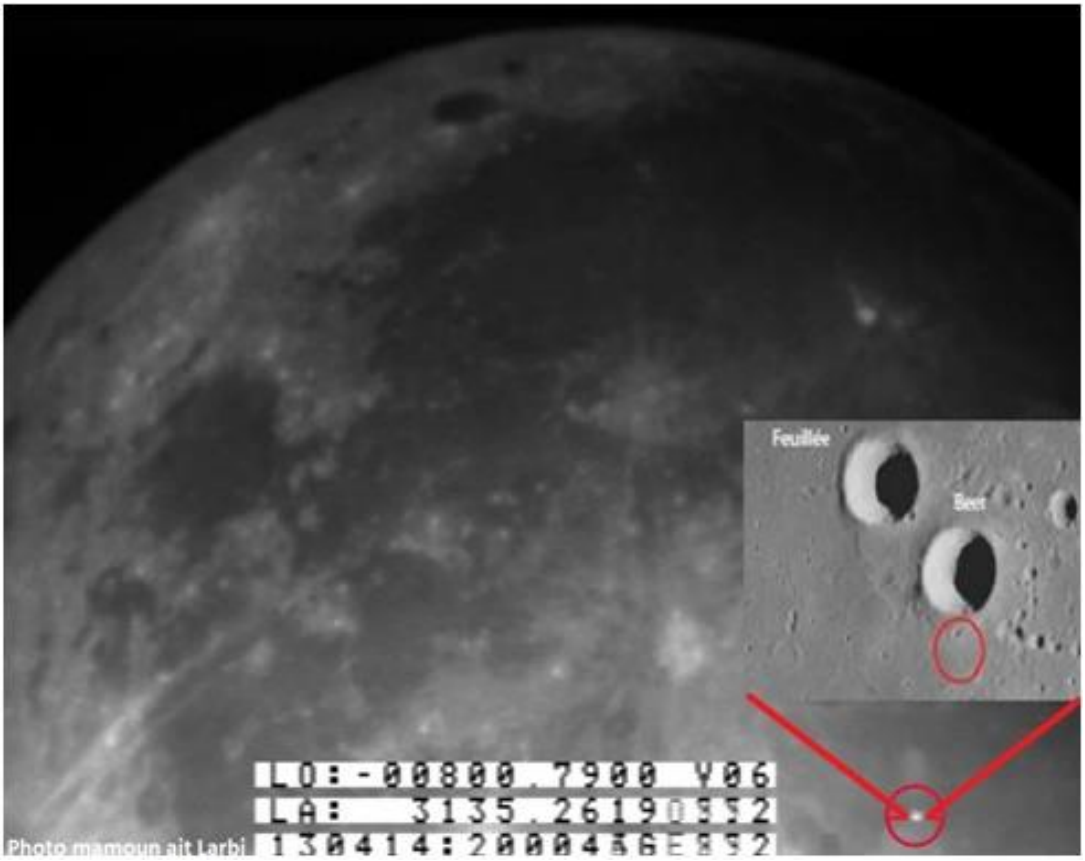
Yanagisawa, M., Ohnishi, K., Takamura, Y., Masuda, H., Sakai, Y., Ida, M., Adachi, M., Ishida, M., 2006. The first confirmed Perseid lunar impact flash. Icarus 182, 489-495.

Yanagisawa, M., Ikegami, H., Ishida, M., Karasaki, H., Takahashi, J., Kinoshita, K., Ohnishi, K., 2008. Lunar impact flashes by Geminid meteoroids in 2007. Meteoritics and Planetary Science Suppl. 43. Abstract 5169.

Zook, H. A., Potter, A. E., & Cooper, B. L. 1995. The lunar dust exosphere and Clementine lunar horizon glow, Proc. Lunar Planet. Sci. Conf., 26 th,.

CHAPITRE III

OBSERVATION DES FLASHS LUNAIRES AU MAROC



Contenu

Introduction 84
I. Observation des impacts lunaires au Maroc 85
II. Découvertes des impacts lunaires 101
III. Implication sur le taux d'impact dans le Système Terre-Lune 123
IV. Implications séismologiques et intérieur lunaire 133
V. Utilité d'un réseau international 142
Références 145

Introduction

Dans ce chapitre nous rapportons les premiers impacts lunaires observés et confirmés depuis un observatoire situé en Afrique et dans le monde arabe. Nous décrivons la procédure suivie pour réussir l'observation, l'interprétation et l'analyse de ces découvertes. Nous présentons les caractéristiques de cinq flashs d'impacts observés et les paramètres physiques déduits. Les résultats expérimentaux décrits dans la littérature seront discutés et comparés aux nôtres. Les magnitudes visibles des impacts observés sont comprises entre 7.1 et 9.6, ils sont tous à images multiples de durées entre 40 et 160 ms. Les énergies cinétiques de ces impacts sont comprises entre 3×10^7 J et 28.7×10^7J. Les projectiles impliqués dans ces collisions pourraient avoir des masses comprises entre 150 g et 2.3 kg (si nous considérons 16,9 km/s comme vitesse d'impact). En utilisant une densité de projectile de 3200 kg/m^3, les diamètres de ces météoroïdes sont estimés entre 5 et 15 cm. Ces impacts auraient donc laissé des cratères sur la Lune ayant des diamètres entre 1,6 à 4,8 mètres.

Nous présentons ensuite une première estimation du flux d'impact à l'issue de cette première phase de surveillance des impacts lunaires depuis nos observatoires. Nos résultats sont cohérents avec le taux donné par d'autres programmes de surveillance des flashs lunaires, tels que ceux de NASA-MFSC, ainsi que d'autres techniques d'observations. En ce qui concerne la surveillance régulière et à long terme des impacts sporadiques, ces résultats prouvent l'importance d'envisager cette piste pour caractériser le taux d'impact sur la Lune et la Terre. Nos estimations du flux d'impact présent indiquent qu'environ 12 ± 4 cratères de diamètres supérieures à 1,5 m sont créés chaque jour sur notre lune, et entre 15.000 et 30.000 météoroïdes de taille > 10 cm entrent en collision avec l'atmosphère terrestre chaque année.

Les futurs réseaux sismologiques lunaires utiliseront les impacts météoritiques comme sources sismiques principales pour étudier la structure interne lunaire, et la détection des flashs depuis le sol est un outil très important pour localiser ces impacts avec plus de précision. Nous présenterons le développement et le test d'une stratégie pour déterminer avec précision les coordonnées des impacts observés optiquement. Une précision de séléno-localisation de moins de 5 km a été atteinte, et nous montrerons que pour une telle précision, l'incertitude de mesure du temps de propagation de l'onde sismique est réduite par un facteur de 6 par rapport à l'erreur engendré par l'inversion temporelle des sismogrammes d'Apollo.

Finalement, nous expliquons l'importance d'implanter un réseau d'observatoires autour du globe. Une telle collaboration permettrait de mieux valoriser des futures explorations lunaires ainsi que l'expertise acquise dans l'observation des flashs au Maroc.

I. Observation des impacts lunaires au Maroc

I.1. Contexte du projet

La thématique des flashs d'impacts lunaires fait partie d'un projet de collaboration Franco-Marocain conçu pour fédérer une équipe de géologue et d'astronome autour de la question du flux d'impact dans le système Terre – Lune (Baratoux et al .2012). La motivation scientifique des partenaires de ce projet est de décrire et comprendre la nature et le flux de matière extra-terrestre et les conséquences de ce flux d'objets sur l'évolution de notre planète. Le projet aborde l'ensemble des phénomènes astronomiques et géologiques liés au flux d'impacts météoritiques, et réunit une équipe internationale pluridisciplinaire d'astronomes et de géologues, essentiellement composée de chercheurs français et marocains. Ce programme a en effet trois axes de recherche, l'un sur l'observation des météores et l'analyse de météorites, un second sur la recherche de cratères d'impact au Maroc, et enfin, l'axe que je porte dans cette thèse qui s'intéresse à l'observation des chutes de météorite sur la Lune.

Le flux de petits corps (méréoroïdes) est responsable de la formation de météores, (ou fireballs en anglais) et bolides lors de l'entrée dans l'atmosphère terrestre. Lorsque les fragments solides sont assez gros, des restes peuvent être récupérés sur le sol : les météorites. Pour les plus gros objets, l'impact au sol peut provoquer la formation d'un cratère et une modification des roches (métamorphisme d'impact, cônes de percussion (shatter cones en anglais). Dans le passé, certains astéroïdes percutant la Terre ont produit des bassins d'impact ayant des diamètres de plusieurs dizaines à des centaines de kilomètres. Ces structures d'impacts sont ensuite affectées par les processus géologiques actifs sur Terre, certaines d'entres elles persistent dans le relief (les plus récents), tandis que d'autres ne sont identifiable que par l'analyse détaillées de roches ayant subi un métamorphisme d'impact. L'étude des structures d'impact est cruciale pour comprendre l'histoire et l'évolution de notre planète, et plus largement celle de notre système solaire interne. La lune est un corps sans atmosphère, les méréoroïdes atteignent sa surface sans rencontrer aucun obstacle et percutent le sol à des vitesses très élevées (> 10 km/s), contrairement à la Terre, ou les objets de petite taille sont freinés dans l'atmosphère. Ces collisions à hyper vitesse produisent les phénomènes transitoires lumineux fréquents appelés «**flashs lunaires**», et sont observables depuis le sol avec des moyens d'observation modestes, comme nous allons le voir.

L'histoire de cette collaboration a démarrée en avril 2009 à l'occasion de l'école de printemps OISA (Oukaimeden International School of Astrophysics), organisée sous la direction de Pr. Zouhair Benkhaldoun, par le LPHEA de la faculté des sciences Semlalia

(Laboratoire de Physique des Hautes énergies et Astrophysique), et l'Observatoire de l'Oukaimeden. L'école avait pour thème la planétologie et réunissait l'essentiel des acteurs de ce projet. La coopération a été également marquée par deux autres évènements internationaux. L'année 2011 a vu se dérouler la seconde conférence de la série AICAC (Arab Impact Cratering and Astrogeology Conference) à Casablanca, organisée par Pr. H. Chennaoui-Aoudjehane, ainsi que la rencontre annuelle de Meteoritical Society, également organisée par Pr. H. Chennaoui-Aoudjehane, et assisté pour le programme scientifique par le porteur français de ce projet Mr. David Baratoux. Ces deux rencontres ont été marquées par un rapprochement d'une communauté internationale de géologues et d'astronomes, une occasion de débats scientifiques qui ont permis aux participants de se retrouver pour renforcer les principaux objectifs de cette collaboration. C'était notamment l'occasion de lancer plusieurs sujets de thèse en co-tutelle, dont celle sur les flashs lunaires, avec ma première inscription sur Juillet 2012.

Plusieurs programmes de recherche en astronomie sont conduits à l'Observatoire universitaire de l'Oukaimeden. Ce projet a représenté pour l'observatoire une possibilité de conforter ses compétences dans le domaine de la planétologie, alors qu'il a déjà acquis une solide réputation dans le domaine de petits corps avec la détection de quatre comètes et quatre astéroïdes. L'observatoire de l'Oukaimeden s'est équipé des instruments nécessaires pour réussir l'observation des flashs lunaires et des météores (Caméra, GPS, réducteurs de focale).

L'un des premiers objectifs au début de ce programme a été de former aux techniques d'observation des impacts sur la Lune, de réussir l'observation de premiers flashs lunaires, et l'élaboration d'un système opérationnel dans nos observatoires pour mener des campagnes des surveillances régulières de la surface lunaire. L'objectif des observations régulières est la quantification du taux d'impact actuel sur la Lune, ce qui aidera à préciser également le flux d'impact sur Terre et déterminer de manière générale la distribution et la fréquence de petits astéroïdes dans l'environnement Terre-Lune, avec des implications pour l'utilisation de l'espace et de l'orbite terrestre (risques d'impact pour les satellites). Le projet s'inscrit également dans le contexte international de préparation aux futures missions sismologiques lunaires qui utiliseront les impacts météoritiques comme sources sismiques pour mieux contraindre la structure interne lunaire. L'observation depuis le sol des flashes d'impacts ouvre la possibilité de fournir l'instant et la position de la source séismique de manière indépendante au profit des réseaux séismiques lunaires (ILN-NASA: 2018 / SELENE II - JAXA : 2017 / Lunette-NASA: 2018), ce qui représente l'une des grandes motivations de ce projet de recherche.

L'observatoire de l'Oukaimeden se place à la suite de cette thèse comme leader Africain pour l'observation des impacts lunaires et pourra jouer un rôle important dans un futur réseau international d'observatoires et souhaite participer à terme à la valorisation scientifique des données sismologiques lunaires et à la caractérisation du flux d'impacts actuel dans le système Terre-Lune.

I.2. Présentation des observatoires

La thématique des petits corps du système solaire fait partie des champs d'intérêts récents de l'université Cadi Ayyad. Le dynamisme de l'Observatoire dans ce contexte est conforté par la réussite dans la découverte de quatre comètes et quatre astéroïdes croiseurs dans la cadre du projet MOSS (Benkhaldoun et al. 2012, http://moss-observatory.org/)

Le Maroc, est l'un des rares pays Africains dotés d'un observatoire astronomique Universitaire « Afrique sud, Egypte, Namibie » 'voir figure III.1'. Oukaïmden se situe à environ 40 km du vol d'oiseau au sud de Marrakech (74 km en route), il culmine à 2700 m d'altitude et fait partie de la chaîne montagneuse du Haut Atlas. L'Observatoire Universitaire Cadi Ayyad situé à Oukaïmden (dénommé dans ce qui suit OUCA) est un centre de recherche sous la tutelle de l'université Cadi Ayyad. L'inauguration de cet observatoire a eu lieu en 2007. À cette date, l'observatoire n'avait qu'une seule tour d'observation avec un télescope C14 et une coupole de 3,5 m de diamètre. En 2008, l'observatoire de l'Oukaïmden est référencé par l'UAI (Union Astronomique Internationale) sous le code "J43".

Depuis son inauguration en 2007, l'OUCA n'a pas cessé d'établir de nouvelles coopérations scientifiques internationales (France, Arabie saoudite, Etats-Unis, la république Coréenne, Belgique) pour élargir son domaine de recherche. Ces projets de collaborations ont permis à l'OUCA de se doter de plusieurs instruments d'observation puissants, sophistiqués et pilotables à distance pour entamer des nouvelles disciplines novatrices. Il dispose maintenant de plus de 5 télescopes comme illustré dans la figure III.2. Plusieurs thématiques de recherches sont en cours de développement à l'OUCA, à savoir : l'étude et la qualification des sites astronomiques, la modélisation de la turbulence optique et aérosols, haute résolution angulaire et interférométrie, l'activité solaire et météorologie spatiale. On trouve notamment, la détection d'astéroïdes, les comètes, les flashs lunaires et les météores. Ainsi que l'observation et la confirmation des exoplanètes.

L'observatoire de Atlas Golf Marrakech (figure III.3), est une unité privée qui fait partie du centre culturel « AGM », qui comprend un musée géologique, une grande bibliothèque très riche et un observatoire dédié à la vulgarisation scientifique ainsi qu'à la recherche

scientifique sous la coordination de l'équipe scientifique de l'OUCA. Cet observatoire comprend un télescope T600, le plus grand en Afrique du nord (figure III.3). Les coordonnées géographiques de nos observatoires sont présentées dans le tableau III.1.

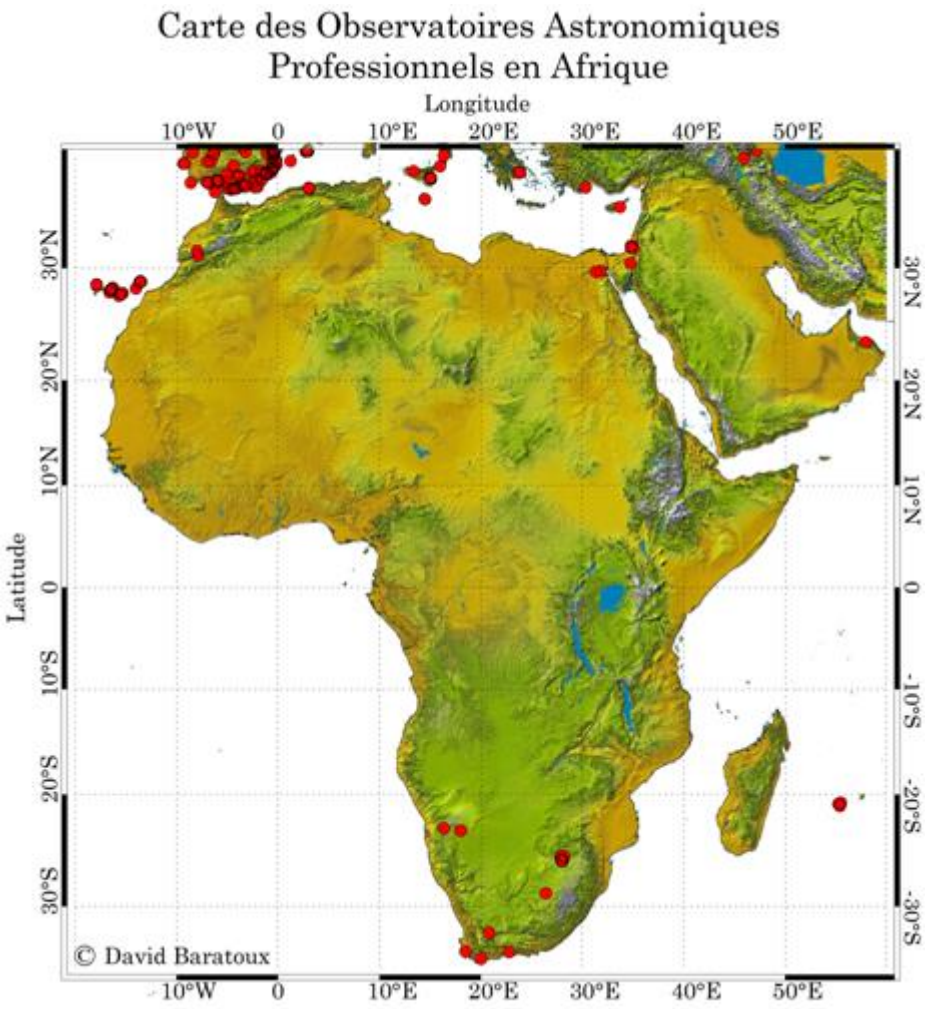


Figure III.1 : Carte des observatoires astronomiques universitaires/professionnels en Afrique (Document extrait du projet d'observatoire Astronomique au Sénégal, Baratoux D., en préparation).

	Station 1 (Obs. Oukaimden)	Station 2 (AGM)
Latitude	31°12'32'' N	31°37'28'' N
Longitude	7°52'52'' W	7°59'35'' W
Altitude	2700 m	466 m

Tableau III.1 : Coordonnées géographiques des stations d'observation des flashs lunaires au Maroc : Observatoire universitaire d'Oukaimden et Atlas Golf Marrakech.

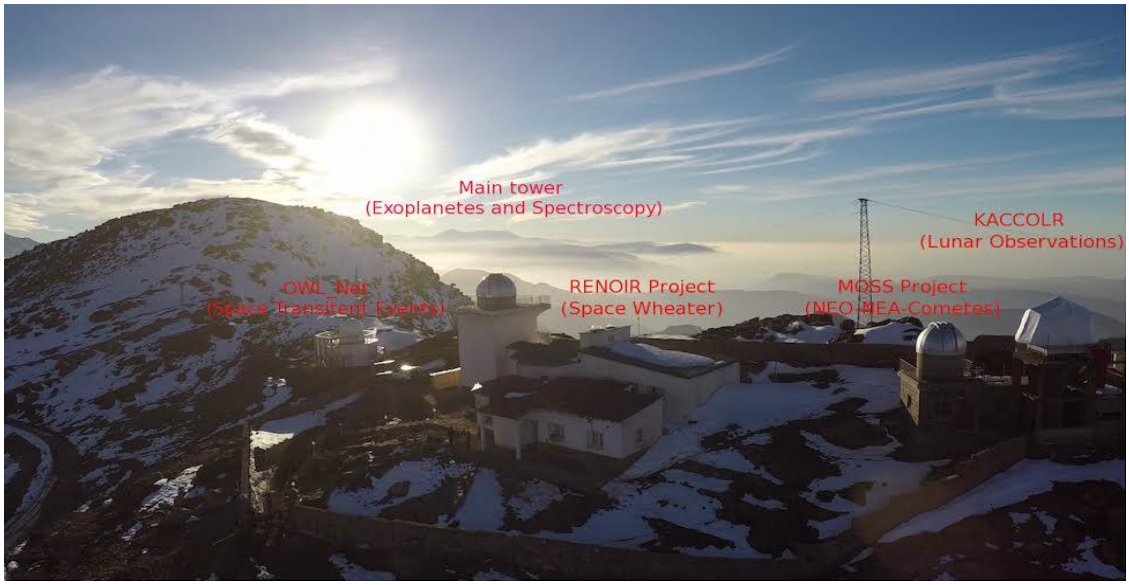


Figure III.2 : Vue de l'ensemble des télescopes installés à l'observatoire de l'Oukaimeden.

Figure III.3 : Vue de l'extérieure de l'observatoire de 'AGM' à gauche, et le télescope T600 à droite.

I.3. Configuration Instrumentale dédié à l'observation des flashs

La configuration instrumentale doit être adaptée afin de répondre aux exigences d'observation en termes de sensibilité lumineuse, de résolution temporelle et spatiale. Les magnitudes des flashs ordinaires sont typiquement entre 3 et 10. Si le capteur est suffisamment sensible, l'utilisation des télescopes de tailles moyennes est donc généralement suffisante pour observer optiquement ces événements (qui atteignent en général des magnitudes > 11 – 12). En termes de champ de vision, les distances focales de ces télescopes sont modifiable à l'aide de dispositifs optiques commerciaux (réducteurs de focale) pour permettre de capturer des champs de visions appropriés aux observations des flashs lunaires

(< à 30 Arcmin ce qui correspond à la ‘distance angulaire du disque lunaire’). Il est en effet essentiel que l’ensemble du disque lunaire soit présent dans le champ pour optimiser le nombre de détections possibles.

Dans nos observatoires, pendant la phase des tests, nous avons essayé plusieurs télescopes de diamètres moyens ainsi que le grand télescope T600 de l’AGM. Notre meilleure configuration consiste à utiliser les télescopes Smith-Cassegrain représentés dans la figure III.4, il s’agit d’un C14 de distance focale 3910 mm et diamètre de 335 mm (f/11) et le C8 Meade LX200 de distance focale 2000 mm et d’ouverture 200 mm (f/10).

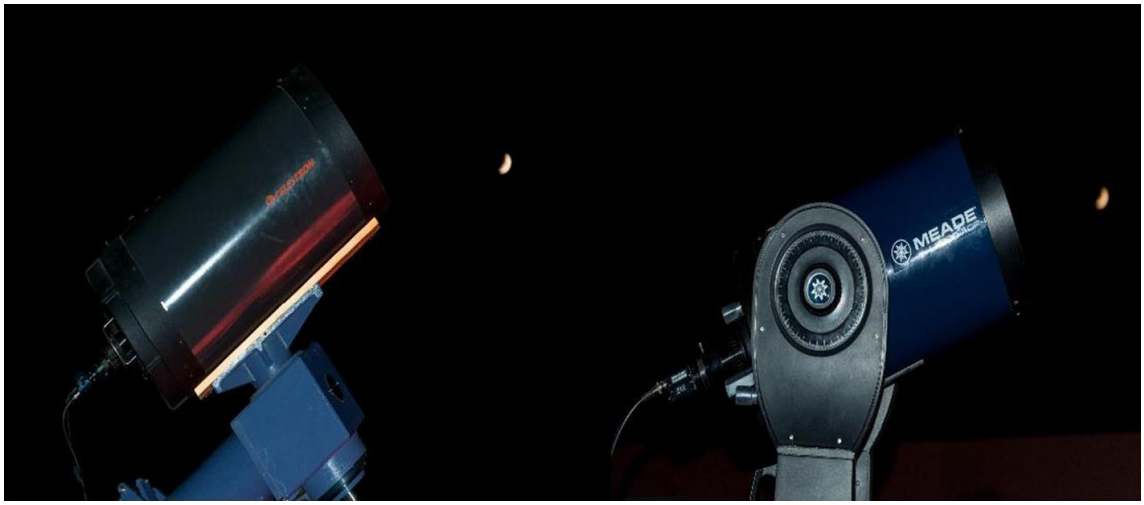


Figure III.4 : Télescopes dédiés aux observations des flashs lunaires à l’observatoire AGM et OUCA.

Les flashs lunaires sont des phénomènes transitoires de très courtes durées, et c’est la caractéristique principale qui a empêché l’observation de ces phénomènes lumineux sans ambigüité avant 1999. Le problème était lié aux vitesses des caméras développées à l’époque, qui n’étaient pas assez sensibles et rapides à la fois (nombre d’images qu’il est possible d’acquérir par unité de temps). C’est pour cela, et jusqu’à ce jour, qu’on trouve sur le marché des caméras sensibles de grande résolution souvent plus lentes en termes de cadence, et les cameras les plus rapides ont souvent des capteurs CCD de dimensions réduites, et donc moins sensibles. A titre d’exemple, pendant une recherche systématique des flashs en 1997 et 1998, Ortiz et al. 2000 ont utilisé des caméras sensibles à temps de pose entre 5 et 10s, ce qui explique leur échec à détecter ces phénomènes de courtes durées. La lumière émise par le flash lunaire se retrouve alors noyée dans le fond émis par la Lune – en effet, même en observant uniquement sur la partie non éclairée directement par le soleil du disque lunaire, la réflexion indirecte de la lumière solaire renvoyée par la Terre (appelée lumière cendrée lorsque la phase lunaire est proche de la nouvelle lune) suffit à masquer un flash lunaire, si le temps d’acquisition est supérieur à la durée du flash. Il y avait aussi un problème lié à la

performance des ordinateurs et la technologie de traitement de signal à l'époque, en effet, l'augmentation de la sensibilité nécessite l'utilisation de grands pixels et par la suite de grands capteurs (pour conserver la résolution). L'association de ces deux paramètres augmente le volume de données pour chaque image, et l'acquisition d'un grand nombre d'images par seconde devient difficile analogiquement et numériquement (pour les cartes d'acquisition et les ordinateurs de l'époque) vu le grand flux de données qu'il faut traiter et enregistrer.

La sélection d'un capteur CCD approprié ne se limite pas aux critères sensibilité et vitesse d'acquisition, mais il y a également d'autres paramètres qu'il faut considérer. Les observations planétaires, et plus particulièrement les observations lunaires, exigent une bonne résolution spatiale, afin à nouveau de ne pas noyer la lumière du flash dans la lumière émise par la surface lunaire, et également afin d'obtenir une bonne localisation sélénographique du flash lunaire. Nous avons vu qu'une bonne sensibilité exige l'utilisation des pixels de grandes tailles, ce qui représente une complexité au niveau de la rapidité d'acquisition de données. Pour assurer une bonne résolution spatiale, le nombre de pixels déployé sur le capteur doit être élevé, ce qui complique d'avantage la tache. Il faut tenir en compte aussi de la taille d'image, cette dernière affecte le champ de vision obtenu et elle dépend de la taille du pixel et la résolution de la CCD. Une taille d'image plus grande aura un champ de vision plus important, pour la même optique et la même résolution. Un grand champ de vision est essentiel en observation des flashs lunaires, il permet de surveiller le maximum possible de surface lunaire, ce qui augmente la probabilité de détection.

La sensibilité a été améliorée par la conception des photorécepteurs ayant une couche semi-conductrice supplémentaire en dessous de la surface de la CCD, une technologie développée par Sony appelée EXview HAD (Hole Accumulation Diode). Dans le marché, on trouve plusieurs capteurs basés sur la technologie EXview HAD produites par Sony et par d'autres fabricants. Notamment, des caméras basés sur cette technologie sont des cameras rapides avec une vitesse d'acquisition de 50 images par seconde (ou frame per seconds, fps). Cette technique est très utilisée dans la technique de vidéo-astronomie, et a trouvée plusieurs applications dans la dernière décennie en observations planétaires (Mousis et al. 2014, Mimoun et al. 2012). Le capteur ICX429 est le plus adéquat pour observer les flashs lunaires. Ce capteur est parmi les plus sensibles en bandes visibles et proche infrarouge, il ne génère pas beaucoup de bruit obscur 'dark current noise', et il dispose d'une grille CCD large et d'une grande résolution (adéquates pour un bon champ de vision).

Figure III.5 : Caméra Watec 902H2 utilisée dans la capture des images vidéo.

-Capteur	CCD 1/2” Super Ex-View HAD Sony
-Résolution	752 x 582 pixels (570 LTV)
-Sensibilité	Maxi 0,00002 lux (F/1,4 gain 38dB)
- Taille d’un pixel	8,6 x 8,3 microns
-AGC	manuel réglable de 5 à 60 dB
-Gamma	Off (1) Low (0,35) Hi (0,45)
-Température	Utilisation -10°C à +50°C
-Dimensions (mm)	39 x 35,5 x 63
-Poids (g)	98

Tableau III.2 : Caractéristiques de la camera Watec 902H2 utilisée dans l’observation des flashs lunaires au Maroc.

La Watec 902H2 (voir figure III.5) est une caméra CCD monochrome rapide et très sensible, avec un capteur de type ICX429 basé sur la technique EXview HAD. Les détails techniques de cette caméra sont donnés dans le tableau III.2. La caméra est largement utilisée en observation des phénomènes de courtes durées tels que les flashes lunaires, les météores, les occultations des objets transe-neptuniens et d’autres observations de petits corps. C’est la camera la plus utilisée par les observatoires professionnels ou amateurs qui s’intéressent aux observations des impacts lunaires. Cette camera vidéo rapide est capable de prendre 50 à 60 images par seconde. Raccordée à des télescopes de tailles moyennes, elle est capable d’acquérir le signal d’étoiles de magnitude 11 ainsi que des détails sur la partie nocturne du disque lunaire éclairé par la Terre (lumière cendrée) (cette caractéristique se révèlera très utile pour localiser nos observations des flashs). Cette camera utilise un grand capteur CCD qui contient 437664 pixels (752×582). Chaque pixel a une taille de 8.6×8.3 micromètre, la matrice a donc une taille de 6,4×4,8 mm, qui est largement suffisant pour capturer un champ de vision assez large pour contenir le disque lunaire dans son ensemble avec les longueurs focales que nous utiliserons. Idéalement, le champ de vision peut être choisi d’une manière qu’il recouvre 30 à 70% de la partie sombre du disque lunaire, une moyenne de 5×10^6 km^2de surface lunaire. Le choix de champ de vision est critique, en effet le nombre de détections est

proportionnel à la surface surveillée dans la partie non éclairée du disque lunaire. En pratique, la surface de la lune observée doit être davantage limitée par la réduction de la zone observée près du terminateur afin de limiter la diffusion dans l'ensemble du système optique (ainsi que par l'atmosphère terrestre), la lumière issue de la fraction illuminée du disque.

Au début de nos observations et comme illustré dans la figure III.6, nous nous sommes retrouvés devant plusieurs choix de champs de visions compris entre 12 et 32 Arcmin. Pour le même capteur, le champ de vision dépend en premier lieu de la distance focale du système utilisé mais varie significativement avec la distance laissée entre la caméra et le télescope. L'optimisation du champ de vision est importante, car il affecte directement la résolution spatiale des images par la suite. D'autre part, il affecte également le seuil de détectabilité des flashs définie par la lumière du fond lunaire, comme prouvé par les images de la figure III.6. Après plusieurs configurations, nous avons utilisé un réducteur de focale 0.33x pour le C14 et un 0.63x pour le C8 pour atteindre une longueur focale effective dans la gamme de 1100-1300 mm, qui nous a permis de capturer un champ de 17 à 21 Arcmin approprié pour ne surveiller que la moitié sombre du disque lunaire avec un bon rapport signal sur bruit (fig. III.6).

Le meilleur outil pour déterminer la date et l'heure précise d'un flash lunaire est le système GPS (Global Positioning System). Pour horodaté les images pendant l'acquisition, nous utilisons un dispositif d'insertion de temps en se basant sur un GPS. Le système Insérer-GPS est présenté dans la figure III.7. Le time-inserter TIM-10 relie la caméra vidéo et le GPS à fin d'insérer électroniquement la date et l'heure sur chaque image du signal vidéo analogique avec une haute précision. Le signal horaire est reçu directement depuis un système de satellites, quelque soit la position, le temps transmis et inséré est en temps universel coordonné (UTC). Ce système permet d'atteindre une précision de 0.001 seconde, ce qui est largement suffisant en comparant cette précision à la vitesse d'acquisition de la camera (0.02 seconde). Le signal doit être numérisé avant l'enregistrement des données, pour ce faire, nous avons choisi un convertisseur analogique-numérique USB branché à la sortie du Time-inserter avant d'enregistrer les vidéos sur disque dur de l'ordinateur. Ce système sert à convertir la vidéo analogique en vidéo numérique et à la compresser avant le traitement informatique. Chaque nuit, des dizaines de giga-octets sont enregistrés, de grande capacité des disques durs externes sont donc nécessaires. Les caractéristiques de nos équipements sont résumées dans le tableau III.3. La combinaison de notre configuration instrumentale est schématisée dans la figure III.8.

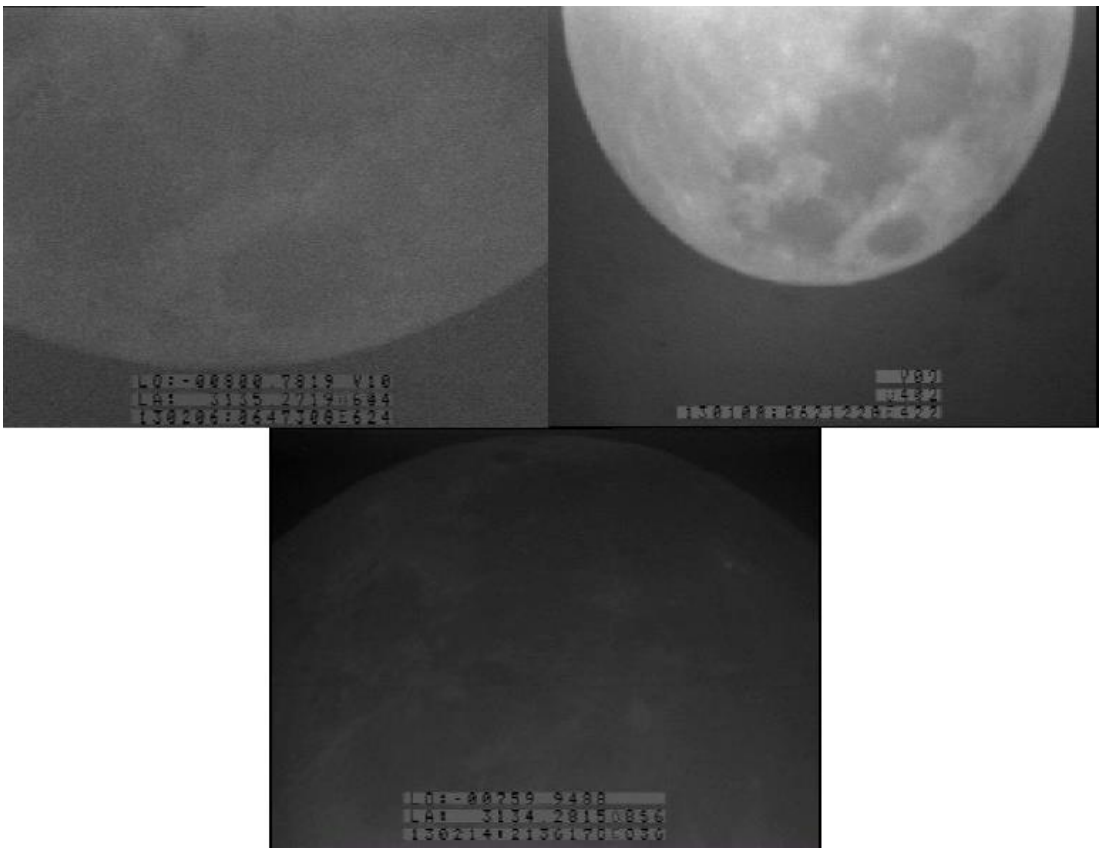


Figure III.6 : Différentes champs de visions possibles pour surveiller les flashs. Un petit champ (à gauche) permet de détecter de plus petits flashs, mais diminue la surface couverte, avec l'inconvénient de manquer des détections sur les parties du disque non observées. Un grand champ (à droite) permet de surveiller l'ensemble de la surface lunaire, mais augmente le seuil de détection et empêche d'observer les plus petits flashs, car ceux-ci seront affectés par la lumière du fond lunaire. Notre choix s'est porté sur le troisième champ caractéristique (en bas).

Figure III.7 : Le système time-inserter TIM10 (à gauche) et le système GPS (au milieu) pour horodater les images. Vidéo Grabber USB (à droite) : Carte d'acquisition sert à convertir la vidéo analogique en vidéo numérique et à la compresser avant de la traiter dans l'ordinateur.

I.4. Manipulation et acquisition

Les flashs d'impacts lunaires ne peuvent être détectés que sur le côté sombre du disque lunaire, donc un maximum de quelques heures d'observation réparties sur 10 nuits par mois lunaire peuvent être consacrées à la surveillance si les conditions météorologiques sont favorables. Pendant chaque mois lunaire, la première session d'observation consiste à quatre ou cinq nuits entre le premier croissant et le premier quartier lunaire (entre le coucher du soleil – ou plus précisément crépuscule astronomique - et le coucher de Lune), et une deuxième session de quatre ou cinq nuits entre le dernier quartier et le dernier croissant (entre le lever de Lune et le lever du Soleil). Les périodes d'observation sont schématisées sur la figure III.9.

	Télescope 1	Télescope 2
Diamètre (mm)	335	200
La longueur focale initiale (mm)	3910	2000
Système de réducteur de focale	0.33x	0.63x
La longueur focale après réduction	1050	1250
Camera utilisée	WATEC 902H2	WATEC 902H2
Capteur du camera utilisée	752×582 pixels	752×582 pixels
Taille des pixels (µm)	8.6×8.3	8.6×8.3
Champ de vision (arc min)	21×15	17×13
Système d'enregistrement du temps	GPS-Time inserter	GPS-Time inserter

Tableau III.3 : Caractéristiques des équipements dédiés aux observations des flashs lunaire au Maroc.

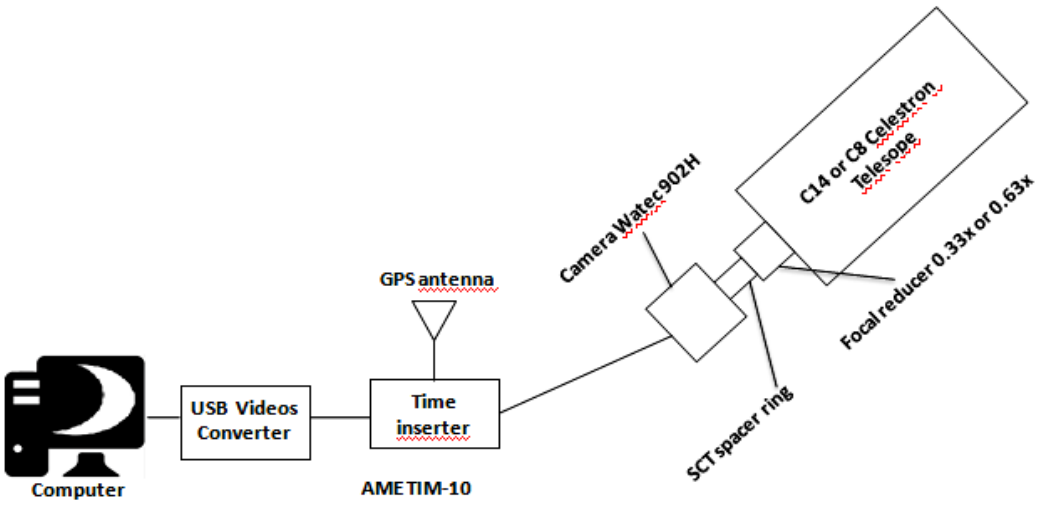


Figure III.8 : Le montage instrumental des équipements utilisés dans les observations lunaires.

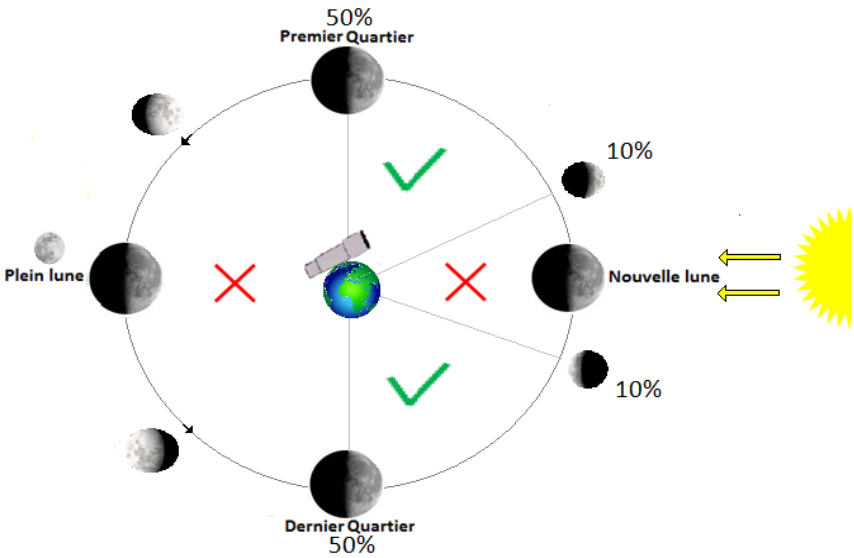


Figure III.9 : Les phases lunaires favorables aux observations des flashs d'impacts.

Le logiciel VirtualDub est utilisé pour capturer et stocker les données prises par la camera WATEC dans un disque dur sous format vidéo AVI. VirtualDub est un logiciel d'acquisition, de lecteur, et traitement vidéo. Il supporte presque tous les formats de données vidéo, et il est soutenu par plusieurs codecs et packages écrits par la communauté scientifique qui s'intéresse au traitement des signaux vidéo. Une vidéo est une composition de plusieurs images consécutives. Dans un enregistrement vidéo de 1 seconde on trouve 25 images pour le système PAL/SECAM (Europe, Afrique), et 30 images pour le système NTSC (Amérique du Nord). Dans notre cas (système SECAM pour le Maroc), la différence de temps entre deux images consécutives est de 0,04 seconde, qui correspond au temps de pose d'acquisition. La manière traditionnelle de la capture d'une image est ligne par ligne, de haut en bas, dans ce qui est connu comme balayage progressif. Pour réduire la bande passante, il est fréquent de capturer des vidéos dans le format entrelacé : D'abord les images avec des lignes de pixels impaires sont scannées et extraites, suivies par les images avec des lignes paires, la combinaison de ces deux demi-images produit une seule image complète. En mode entrelacé la différence de temps entre deux champs consécutifs est de 0.02 secondes. Donc la technique d'entrelacement est également un moyen pour doubler la cadence d'acquisition et permet d'améliorer la résolution temporelle, ce qui est très utile pour la détection des événements transitoires comme les flashs lunaires. Le mode PAL/SECAM utilise donc un taux d'images de 50 fps (frame per second) alors que le mode NTSC utilise généralement une cadence un peu élevée de 60 fps. Cela est dû au fait que le mode NTSC est généralement utilisé dans les pays avec une fréquence des courants industriels de 60 Hz et PAL/SECAM dans les pays à 50 Hz (Europe, Asie, Afrique). Bien qu'il existe un léger avantage dans le système NTSC en ce qui concerne la résolution temporelle, les systèmes PAL et SECAM utilisent généralement

jusqu'à 578 lignes, tandis que le mode NTSC utilise 480 lignes seulement. Cela signifie que pour un même champ de vision, les modes PAL et SECAM ont une résolution spatiale améliorée de 20%. Il est à noter que même en mode PAL/SECAM, on peut utiliser des résolutions réduites si le but est de réduire la quantité de données stockées. À titre d'exemple, au début des observations, nous avons essayé avec une taille de 640×480, qui occupe 1 Go pour chaque minute de données vidéo, et après nous sommes passé à une résolution de 720×578 pixels qui nécessite plus d'espace sur le disque dur ~ 1,9 Go/minute (110 Go par heure d'enregistrement).

Chaque nuit, nous enregistrons plusieurs séquences de 30 minutes chacune. Près des croissants lunaires (début et fin du mois), les durées de surveillance varient entre 45min à 1h30min. Pendant le premier ou le dernier croissant, les durées peuvent aller jusqu'à cinq heures de surveillance. La quantité de données acquises varie donc entre 80 à 500 Go pour une seule nuit d'observation selon la phase lunaire et la qualité de données recherchée. Nous prenons également une petite séquence vidéo à obturateur fermé 'dark-field', que nous nous soustrayons de la vidéo brute durant la recherche automatique des flashs sur les images. La gestion de la quantité de données accumulées pendant les sessions d'observations n'est pas donc une tâche facile, surtout en termes de procédures suivies pour identifier les impacts dans les données acquises.

I.5. Identification des événements candidats

Le logiciel LunarScan (Gural 2007) est utilisé pour analyser les vidéos enregistrées afin d'effectuer une détection automatique d'événements transitoires dans le champ de vision. LunarScan a été conçu pour fonctionner d'une façon autonome, en scannant image par image à travers le fichier AVI fourni, il utilise une interface de lecture vidéo AVI. Pour chaque image scannée, chaque pixel est testé pour voir si sa valeur passe au-dessus de seuil de réponse défini par l'utilisateur. Un algorithme spatial de détection est utilisé pour ne valider que les événements répandus sur plusieurs pixels adjacents respectant le critère précédant. La forme de ce regroupement de pixels est aussi définie par l'utilisateur. La forme idéale pour notre application correspond à la recherche d'un triplet horizontal de pixels dépassant le seuil de sélection plus un excès de pixels supplémentaire dans les deux lignes au-dessus et au-dessous du pixel central du triplet. Ce schéma permet d'éviter les nombreuses fausses détections qui se produisent généralement sur des pixels n'ayant pas une forme symétrique autour d'un pixel central.

Il est préférable d'interrompre tous les programmes autres que LunarScan afin de libérer toute mémoire allouée à une application (mais pas encore libérée au système). Après exécution de LunarScan, l'utilisateur se trouve devant les fenêtres illustrées dans la figure III.10 : fenêtre de configuration, fenêtres de graphique et affichage, et la fenêtre du menu principal.

L'affichage du menu principal fournit à l'utilisateur plusieurs options de traitement. Ces options de traitement peuvent être exécutées dans un ordre quelconque, mais l'ordre normal serait 1, 2, 3, 4, 5, ... Les options dans le menu principal comprennent les modes suivants :

(**1**) Définir le masque, la région de traitement, et la région de surface lunaire

(**2**) Générer une correction du champ obscur (darkfield).

(**3**) Analyser les données vidéo pour identification des flashs.

(**4**) Confirmer les flashs candidats.

(**5**) Résultat d'analyse et génération des fichiers images au format TIFF.

(**F**) Prédiction de la zone d'impact lunaire pendant une pluie de météores.

(**P**) Lecture de données AVI.

(**T**) Test de synchronisation.

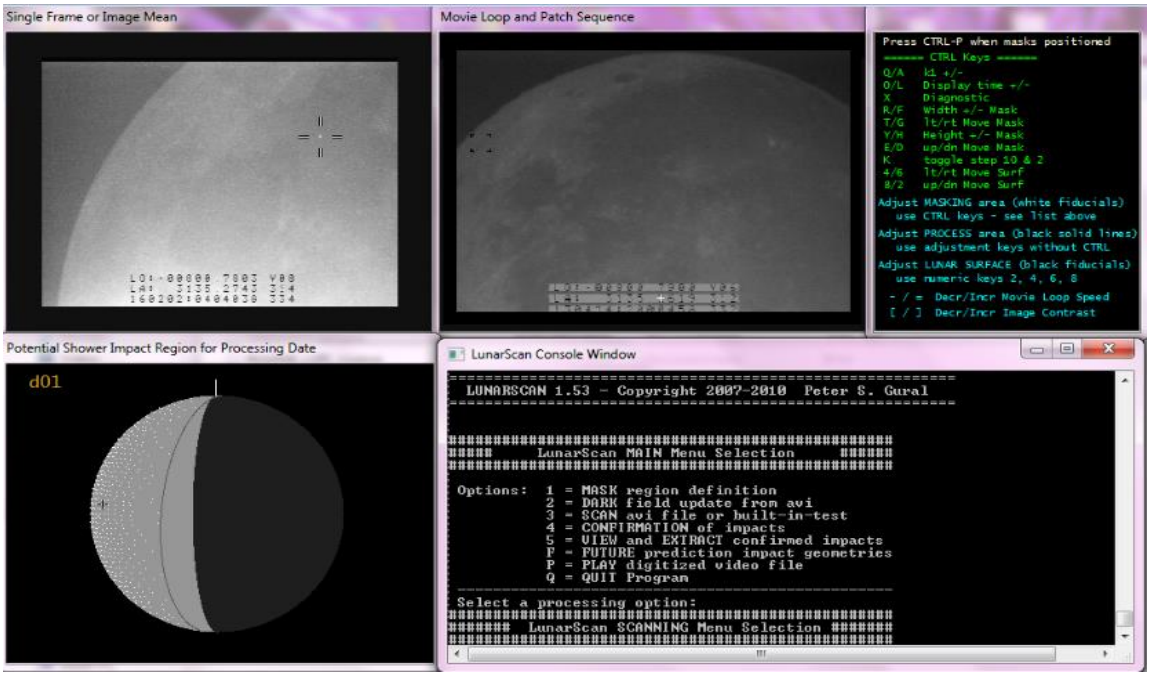


Figure III.10 : Prise de vue de différentes fenêtres de LunarScan figurant pendant l'analyse.

Les événements transitoires détectés automatiquement par LunarScan sont ensuite examinés manuellement pour éliminer les fausses détections et sélectionner ceux avec les caractéristiques typiques de flashs d'impacts. Au cours de cette première étape, nous étions obligés de ne considérer que les flashs visibles sur plusieurs images, car les petits flashs de courtes durées, surtout ceux qui ne sont visibles que sur une seule image peuvent être

confondus avec les fausses détections qui seront l'objet du projet paragraphe. Bien évidement, les petits flashs sont les plus fréquents, mais le seul moyen de confirmer des flashs très court est l'utilisation de deux télescopes simultanément. En utilisant un seul télescope, on se limite donc aux flashs de plus longues durées, et par conséquent aussi aux flashs les plus lumineux qui sont plus rares (voir relation durée-magnitude, Bouley et al. 2012) ; il faut donc avoir une grande persévérance pour observer ce type de flashs, visibles sur plusieurs images successives. Comme on va voir par la suite, les critères suivis pour confirmer les flashs à images multiples concernent en première lieu : la magnitude en fonction de la durée, la distribution spatiale du signal, et la courbe de lumière.

I.6. Confirmation des flashs d'impacts

La confirmation des flashs s'effectue à la base des paramètres mesurés tels que la position, la durée, et la magnitude lumineuse. Il faut rappeler que les petits flashs, qui n'apparaissent que dans une seule image, doivent être confirmés par au moins deux observatoires différents pour exclure les fausses détections. Ceci est important car les fausses détections sont en général de très courtes durées (<20 ms), et elles n'apparaissent donc que sur une seule image. Dans la majorité des cas, les fausses détections les plus communes sont soit : des bruits électroniques intrinsèques de la camera, des rayons cosmiques qui frappent le capteur de la camera. D'autres fausses détections moins fréquentes peuvent être causées par les réflexions spéculaires des satellites ou des débris artificiels en orbite terrestre, ou bien des météores dans l'atmosphère. Ces dernières détections sont en principe faciles à écarter, car elles montrent des mouvements à travers les images capturées (Suggs et al. 2014, Suggs & Moser 2013). Les différentes formes de fausses détections sont dans la figure III.11.

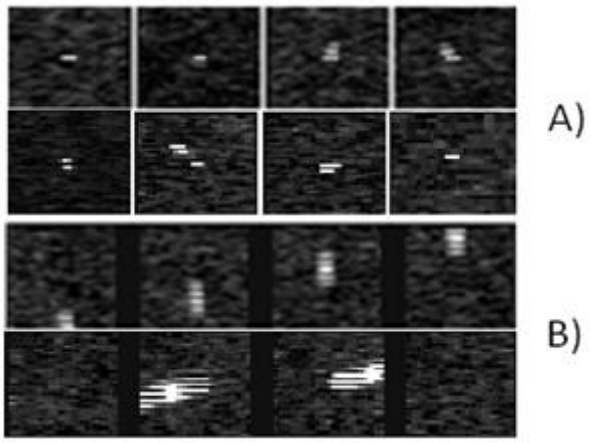


Figure III.11 : Différentes fausses détections principales : A) Rayons cosmiques ou bruits électroniques : Ces détections n'apparaissent que sur une seule image; B) Satellites ou débris artificiels : Détections montrent des mouvements à travers les images successives.

Le critère d'observer un événement (au même endroit) sur plusieurs images est nécessaire pour confirmer les flashs observés par un seul instrument comme c'est le cas des flashs présentés dans ce travail. Les critères de confirmation peuvent être invoqués de la façon suivante :

1) Tout d'abord, la source lumineuse doit être stable: ce qui veut dire que le groupement de pixels excités ne devrait monter aucun mouvement à travers les images successives où l'événement est observé, de la sorte que le centroïde de ces pixels est presque le même sur toutes les images consécutives.

2) La répartition spatiale d'intensité (PSF : point spread function) des pixels illuminés doit révéler le profil exact d'une étoile ou tout véritable point stellaire lumineux dans l'espace.

3) Troisièmement, puisque l'événement est observé sur plus d'une image, les changements de luminosité à travers ces images doivent être conformes aux attentes et la courbe de lumière qui doit présenter une soudaine augmentation du signal suivie d'une baisse relativement lente (décroissance proche d'une courbe exponentielle).

4) Plus important encore, les valeurs des magnitudes et les durées doivent être en accord avec le fait que plus le flash est lumineux plus le nombre d'images sur les quels il sera observé sera important. Ces valeurs doivent suivre la tendance établie à partir d'un catalogue de 54 flashs d'impacts compilés par Bouley et al, (2012).

Ces critères de sélection sont schématisés dans la figure III.12.

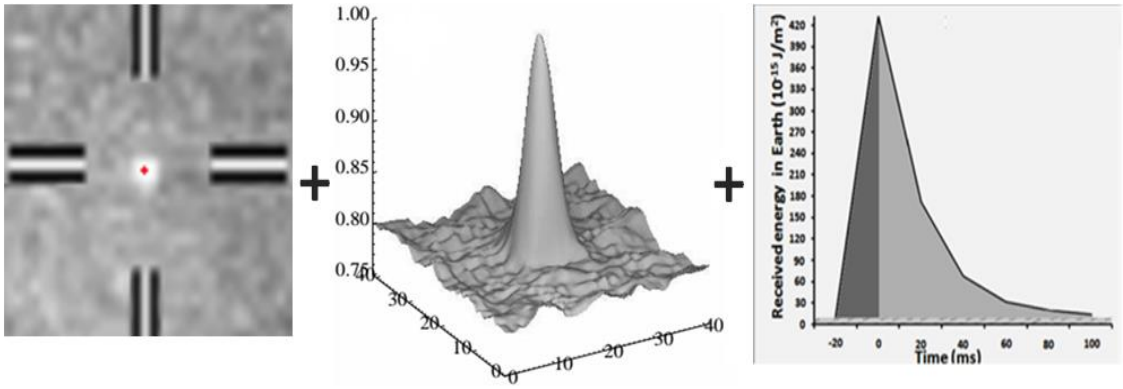


Figure III.12 : Schématisations des critères préliminaires pour sélectionner les flashs candidats. La source lumineuse excite le même cluster de pixels (pas de mouvement à travers les images) ; un véritable profil de répartition d'intensité (PSF) ; Courbe de lumière d'un flash (augmentation soudaine du signal suivie d'une forte baisse).

Les critères d'identification que nous avons appliqué aux résultats de nos observations sont cohérents avec les caractéristiques de la base de données des flashs observés par NASA-MSFC (Suggs et al, 2013 ; 2014), et le critère de détection à images multiples a été aussi considérés par autres observatoires qui utilisent un seul télescope pour observer les flashs lunaires. En effet, en utilisant une seul télescope, Jedediah & Ryan 2015 ont pu confirmer 6 flashs à images multiples de durées entre 30 et 80 ms, est c'est après analyse de 80 heures de données vidéos enregistrées entre automne 2010 et au printemps 2013 (projet en collaboration avec NASA-MFSC 'Marshall Flight Space Center').

II. Découvertes des impacts lunaires

II.1. Observation

La probabilité de détecter un flash lunaire augmente fortement si les observations sont menées au cours les nuits correspondant aux pics d'activités des pluies météoritiques. Cependant, presque toutes nos observations se sont déroulées en dehors des périodes où les grandes pluies de météoroïdes sont actives. En effet, au cours des dernières années, Il y avait très peu d'occasions où la phase lunaire était favorable pour réussir des observations pendant les périodes d'activités des essaims majeurs (quand les essaims de météoroïdes rencontrent l'orbite du système Terre-lune). Parfois, quand la phase lunaire est adéquate, la géométrie de la rencontre n'était pas favorable, le radiant de l'essaim se trouvait dans l'hémisphère caché de la lune et la section efficace des impacts résultante est décourageante dans ces cas. Des exemples de rencontres favorables sont schématisés dans la section III du deuxième chapitre.

Malgré cette malchance durant les pics des pluies de météoroïdes, où il est théoriquement possible de détecter plusieurs impacts durant une seule nuit, nous avons réussi la détection de plusieurs beaux flashs sporadiques à images multiples. L'avantage d'observer des impacts sporadiques en effectuant des surveillances en dehors des périodes d'activités des pluies météoritiques, c'est que les météoroïdes sporadiques sont en général des fragments d'astéroïdes de toutes tailles. L'observation régulière pendant toute l'année permet la détection de grands impacts et ce à l'inverse des restes cométaires, qui sont en principe des essaims de poussières contenant des projectiles ayant une taille supérieure limite définie par les processus de sublimation et fragmentation des comètes. Plus important encore, le calcul du flux d'impacts se base sur la surveillance des événements sporadiques tout au long de l'année et non pas les observations pendant les nuits particulières d'activités météoritiques. Il apparaît

donc essentiel de contraindre ce flux d'impact sporadique, et non seulement le flux d'impact associés aux pluies de météores.

Au début de notre programme, nous avons réalisé plusieurs campagnes d'observations pour optimiser et maitriser la configuration instrumentale. En janvier 2013, nous avons pu compléter les équipements afin de réaliser les observations dans des conditions optimales et nous avons abouti au montage de la manipulation qui répond à 100 % aux exigences d'observation des flashs d'impacts sur le coté sombre lunaire. Le but initial était de détecter des flashs de longue durée visibles sur plusieurs images consécutives. Il y avait également l'objectif de développer une approche pour localiser les impacts sur la surface lunaire avec un maximum de précision, une approche que l'on peut utiliser pour fournir des localisations précises des impacts aux profits des futurs réseaux séismologiques pour mieux contraindre la structure intérieure lunaire, ce qui constitue l'une des principales motivations de ce travail. C'est avec cet objectif que nos premiers observations ont été effectuées principalement juste avant ou après la nouvelle lune où les caractéristiques de la surface lunaire sur le coté sombre sont assez visibles sur les images grâce à la lumière cendrée, ce qui va nous permettre notamment de développer une approche de localisation.

Les premiers succès ont suivi avec les premières confirmations des flashs lunaires en février 2013 et Avril 2013, des flashs à images multiples de haute qualité du point de vue signal/bruit et avec un fond lunaire suffisamment lumineux (lumière cendrée) pour développer notre approche originale de localisation. Les observations ont été pour suivies régulièrement, et nous avons réussi la détection et la confirmation de trois autres flashs d'impacts en Novembre 2014, Décembre 2014, et en Novembre 2015. Parmi les milliers de fausses détections que nous avons identifiées (90% = bruit électronique + rayons cosmiques), seuls cinq événements ont persisté sur deux images ou plus en montrant des changements de luminosité adéquats sur les mêmes pixels. L'analyse photométrique plus l'examen de leurs courbes de lumières (forte augmentation soudaine du signal suivie d'une baisse lente) confirme qu'ils agissaient de véritables flashs d'impacts lunaires.

Les caractéristiques de ces événements étaient variées, ce qui nous permet de poser des questions pertinentes et ouvre des discussions et des réflexions en ce qui concerne la durée, confirmation et l'analyse des flashs, ainsi que en termes de comportement d'évolution de ces événements lumineux (voir Annexe B : résumé de Lunar Impact Workshop ESTEC-ESA 2015). Nous sommes également capables de discuter les implications de ces observations (préliminaires, à partir de 4 flashs seulement) sur le taux d'impact dans le système Terre-Lune. La qualité de nos images nous a permis de développer l'approche de localisation, qu'il

conviendrait de perfectionner encore pour atteindre une résolution kilométrique idéale pour la sismologie lunaire.

Pour discuter les critères de confirmation, l'analyse, ainsi que les interprétations préliminaires, nous proposons de prendre comme exemple les premières découvertes réalisées en 2013. Ces détections ont un rôle crucial et très important, car c'est grâce à eux que nous avons pu faire confiance à notre instrumentation et à notre procédure d'analyse, ainsi de développer et tester l'approche de localisation des impacts.

II.2. Les premières découvertes

En Février 2013 et Avril 2013, nous avons effectué deux sessions d'observation dans les conditions les plus optimales possibles en ce qui concerne les conditions météorologiques, ainsi que les phases lunaires, à savoir, les phases correspondant aux croissants lunaires (nuits avant et après la nouvelle lune). La session d'observation correspondant à la première découverte a été menée pendant le dernier croissant (les nuits avant la nouvelle lune). Dans une telle session, les observations s'effectuent vers l'Est et commencent avec le lever de la Lune et s'arrêtent avec le lever du Soleil. Cinq heures de données vidéo ont été enregistrées pendent cette première session, les observations ont été effectuées le 5 Février entre 03h30 et 06h30 et le 6 Février entre 04h30 et 06h30 avant le lever du soleil pendant les aubes du 26ème et 27ème du mois lunaire. Les données enregistrées sur notre disque ont été analysées ensuite avec LunarScan, après élimination de toutes les formes de fausses détections par application des critères cités avant, l'instant du premier flash candidat détecté (F1) correspond à une observation faite 15 min juste avant le lever du soleil pendant la deuxième nuit d'observation.

En Mars 2013, les conditions météos n'étaient pas favorables pour faire de bonnes observations (nuages, brumes, vent...). Une autre série de surveillance a été réalisée le 14, 15, 16 et 17 Avril 2013, entre le premier croissant et le premier quartier (3, 4, 5 et le 6 jour du mois lunaire). Au cours d'une telle session, le disque lunaire se trouve vers l'Ouest et l'observation s'effectue après le coucher du soleil jusqu'au le coucher de la Lune. Nous avons réussi l'acquisition de dix heures de donnés durant ces quatre nuits, dont plus de 90% de haute qualité (10% perturbé par les nuages). L'analyse de données sous LunarScan a révélé un deuxième flash candidat 'F2' détecté pendant les 5 premières minutes de la première nuit (14 Avril) de la série d'observations, et aucune détection supplémentaire n'a été rapportée sur le reste de données enregistrées.

Le flash du 6 Février 2013, a été observé avec la caméra Watec 902H2 attachée au télescope SC de diamètre 20 cm (f/10) et avec l'utilisation d'un réducteur de focale f/6.3.

Tandis que celui du 14 avril 2013 a été observé en utilisant cette fois le télescope SC de 35,5 cm (f/11) équipé d'un réducteur de focale f/3.3, et avec la même camera Watec 902H2. Les deux événements ont été détectés automatiquement par LunarScan, les images correspondent aux pics des luminosités sont présentées dans la figure III.13. La date, l'instant, et les coordonnées géographiques (de l'observateur) sont insérées par le système Time Inserter-GPS en bas de chaque image. Les cordonnées géographiques sont insérés de telle façon que : 'LO' désigne la longitude et 'LA' la latitude. La date et l'heure sont indiquées en troisième ligne, pour F1 par exemple : «13 02 06 : 06 29 56.756» signifie une détection au 06 Février 2013 à 06h29min56s756ms.

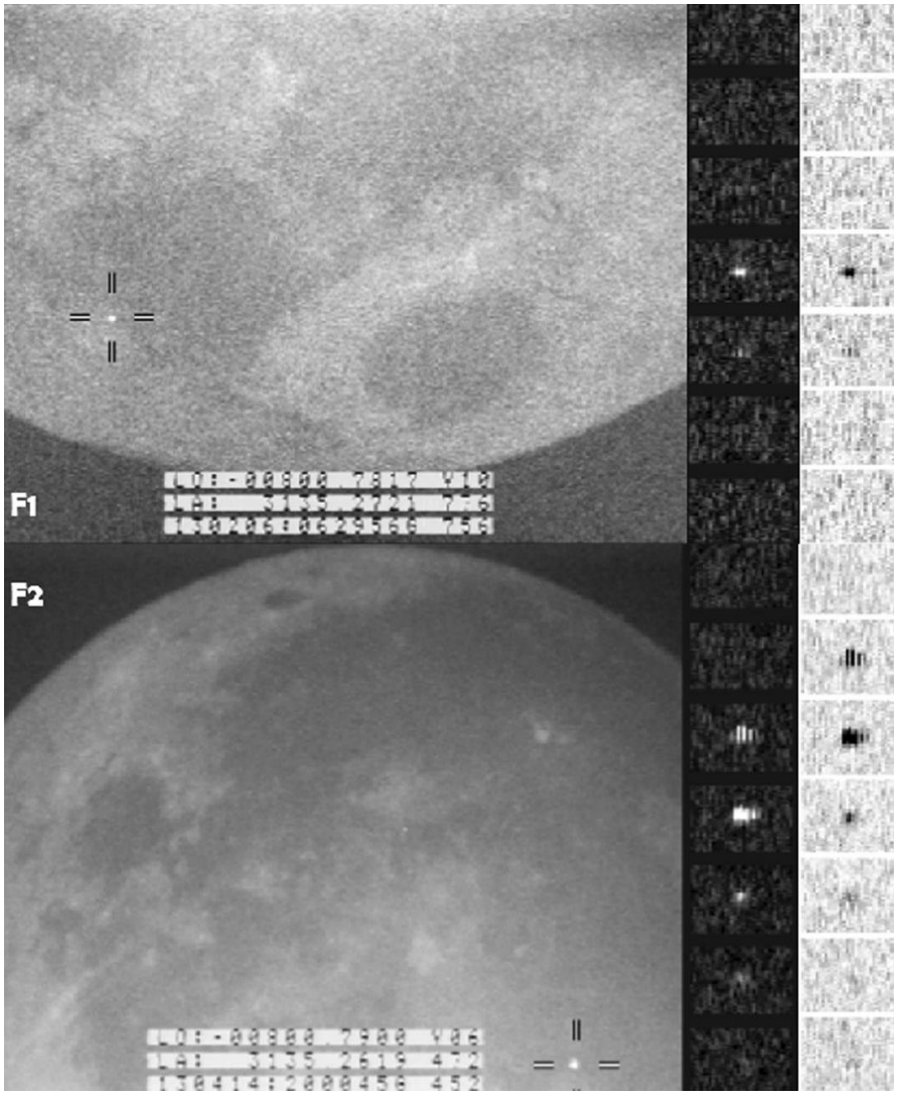


Figure III.13 : Les deux premiers flashs détectés par LunarScan, avec des sous-images brutes pour chaque événement (en positif et négatif). *Haut* Flash1 du 6 Février 2013, *bas* Flash2 du 14 avril 2013 (Ait Moulay Larbi et al. 2013).

Toutes les images consécutives où les événements détectés apparaissent sont identifiées à l'aide de LunarScan. Nous utilisons le logiciel VirtualDub pour extraire le morceau vidéo

correspond aux images contenant l'événement ainsi que quelques images avant et après l'événement dont on aura besoin dans l'analyse. Les images sont extraites à partir de ce fichier vidéo AVI en fichiers images au format PNG. VirtualDub peut d'extraire les images en différents formats tels que JPEG, GIF et PNG. Le format PNG a été choisi parce qu'il se base sur le codec bitmap qui utilise une compression sans aucune perte de données. Les images extraites par VirtualDub sont ensuite converties dans un format (FITS) approprié à l'analyse photométrique en utilisant notre programme de photométrie d'ouverture que nous avons développé sous IRAF. Pour faire de bonnes interprétations, et comme les images sont prises par la caméra en mode d'entrelacement, il est utile de désentrelacer ces images brutes en séparant chaque image en deux champ d'images, l'un issues des lignes paires et l'autre issue de les lignes impaires. Pour ce faire, nous utilisons l'algorithme YADIF (Yet Another De-Interlacing Filter) écrit par Michael Niedermayer disponible aussi sur VirtualDub. Le désentrelacement permet de passer de 40 ms à 20 ms de résolution, ce qui favorise l'analyse de la courbe de lumière avec plus de détails.

II.2.1Analyse préliminaires et paramètres mesurés

II.2.1.1.Localisation temporelle

Après identification d'un flash, les premiers (et les plus simples) paramètres examinés sont : l'instant et la durée de l'événement. La précision du temps est importante pour la confirmation d'un flash candidat par un autre observatoire si nécessaire, ainsi que pour le calcul de la durée du flash. C'est plus important encore dans le cas où le but est de fournir le temps d'impact au profit des futurs sismogrammes lunaires qui utiliseront ces impacts comme sources sismiques.

L'instant de l'impact est déterminé sur la base du temps inséré dans l'image qui coïncide avec la première apparition de l'événement, et le nombre d'images où le signal du flash est identifiable est directement lié à la durée de l'événement. En revanche, l'utilisation des images brutes pour extraire ces paramètres peut être trompeuse, car ces images sont composées de deux demi-images (paire et impaire) séparées par un intervalle de 20 ms. Comme expliqué dans la figure III.14, le recours aux images brutes pour chercher la première apparition a quelques contraintes, en particulier si le moment de l'impact a coïncidé avec le temps d'exposition et correspondant à l'image paire. Le calcul de la durée d'un flash à la base du dénombrement des images brutes où le flash est visible n'est pas conseillé. Le désentrelacement de ces images est essentiel pour calculer cette durée avec précision. Les erreurs qui peuvent être commises sont illustrées dans la figure III.15. Il est à noter que le fond lunaire peut cacher le flash dans le signal reçu par le capteur, si le flash n'est pas assez

lumineux et/ou assez volumineux. Dans les premiers instants du flash, celui-ci peut-être un plasma opaque au rayonnement et il faut attendre que le nuage atteigne une taille suffisante pour que le rayonnement thermique s'en échappe. Lors du refroidissement, l'intensité lumineuse diminue (si rayonnement purement de corps noir, l'intensité varie avec la température à la puissance 4), et la luminosité de flash passe alors sous le seuil de détection bien que le phénomène ne soit pas complètement terminé. De ce fait, les premières et dernières millisecondes d'un flash (lors de l'extension du nuage, et lors de son refroidissement) peuvent être manquées, ce qui engendre une sous estimation de la durée réelle de l'événement. Pour un bon suivi de l'évolution photométrique et pour augmenter la capacité de détection des petits événements, des optimisations de la bande spectrale observée sont envisageables. Les instants révélés pour les Flashs F1 et F2 sont 06h 29min 56s 756ms ± 0.01s et 20h 00min 45s 422 ms ± 0.01s, et les durées mesurées sont 60 à 80 ms et 160 à 180 ms respectivement pour les F1 et F2. Nous allons voir par la suite que ces durées sont cohérentes avec les magnitudes visuelles estimées, ce qui représente l'un des critères de confirmation de ces découvertes.

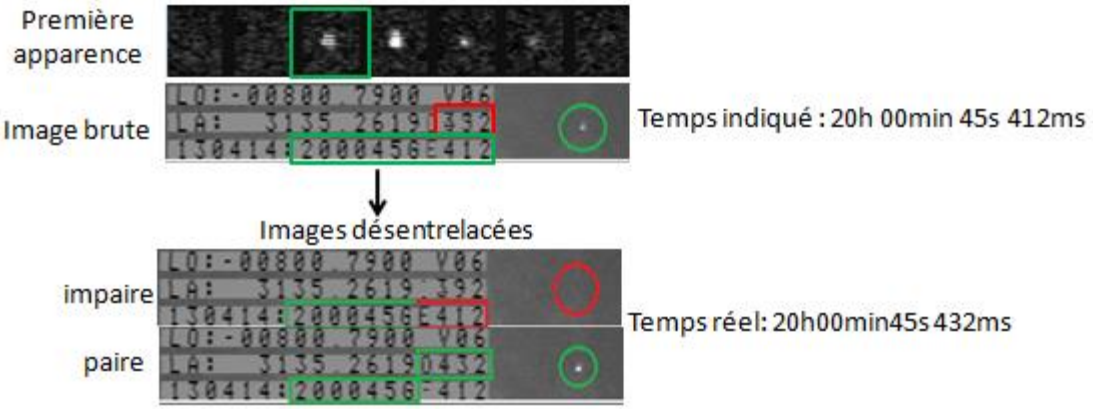


Figure III.14 : La première image brute du flash F2 indique une première apparence du flash au moment de l'acquisition du premier champ (impair).Après désentrelacement, il s'avère que l'instant réel du flash corresponde au temps d'acquisition du deuxième champ (pair). Le temps est inséré dans le signal à la sortie de la caméra après l'acquisition de l'image et non pas par un logiciel d'acquisition qui contrôle la caméra. De ce fait, le temps d'impact moyen est alors 20h00min45s422 ms ±10 ms.

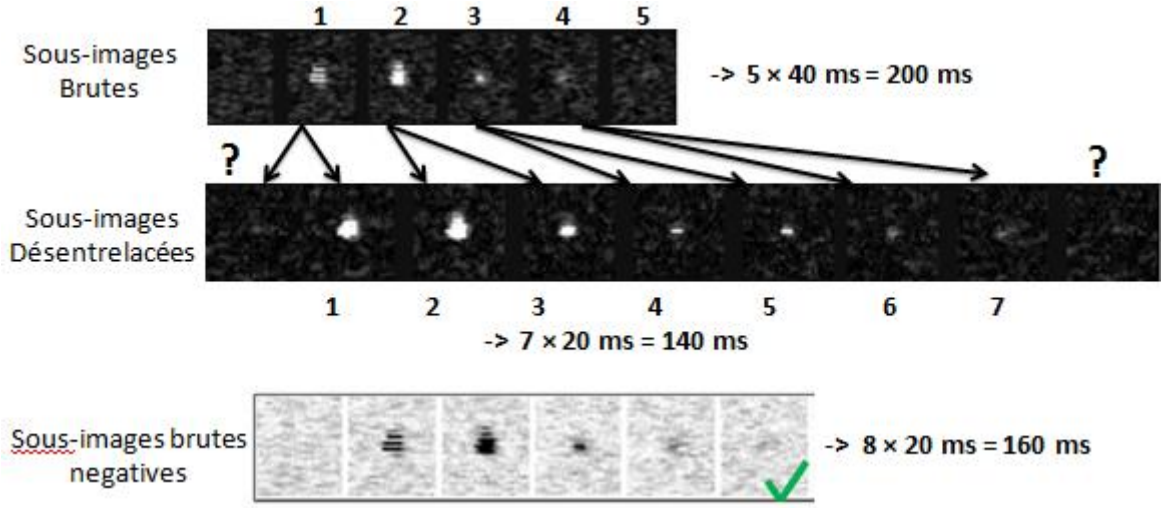


Figure III.15 : La durée d'un flash à la base des images brutes peut être surestimée ou sous-estimée, une double vérification en se basant sur les images désentrelacées et les images négatives est nécessaire pour calculer la durée avec précision. Il ne faut considérer que les images dont les valeurs des pixels excités dépassent 3 fois l'écart type du bruit. la durée du flash est entre 160 et 180 ms.

II.2.1.2. Localisation spatiale

Nous rappelons ici que la localisation précise des impacts sur la surface lunaire a pour premier objectif d'identifier les cratères associés aux événements observés dans les images de haute résolution prises par les caméras embarqués à bord des orbiteurs lunaires. Plus important encore, et en ce qui concerne l'implication sur la séismologie lunaire, la localisation des impacts est un facteur décisif pour faire une bonne inversion des ondes sismiques.

Les flashs que l'on observe sont généralement étalés sur un groupement de pixels dont il convient de déterminer le centre, pris comme position du cratère d'impact. Le centre d'un flash peut être calculé avec précision de sous-pixel en utilisant les techniques standards : 'Centroïde' ou 'Fit gaussien'. Lors de l'acquisition des images, les caractéristiques majeures de la surface lunaire sont visibles dans la lumière cendrée. Les coordonnées de ces caractéristiques vont être utilisées pour faire des transformations astrométriques et convertir les coordonnées (en pixels) d'un flash en termes de coordonnées sélénographiques lunaires (latitude et longitude sur la surface lunaire).

L'approche que l'on a suivie pour faire une bonne localisation des flashs est décrite avec plus de détails dans la section IV. Les fits gaussiens appliqués sur les deux découvertes F1 et F2 sont donnés dans la figure III.16. Les profils de la répartition spatiale de l'intensité lumineuse sur les pixels permettent également de confirmer que les événements observés sont bien des flashs lunaires. Les coordonnées mesurées en pixels, par application d'un fit gaussien 2D, pour chaque flash sont reportés dans le tableau III.4. Ces calculs confirment que les

événements observés ne montrent aucun mouvement à travers les images successives où ils sont visibles. Ce dernier facteur ainsi qu'un profil adéquat (axisymétrie) de la répartition spatiale de luminosité, permettent de confirmer à nouveau l'existence d'un événement transitoire à la surface de la Lune. Les coordonnées sélénographiques trouvées par astrométrie cartographique sont 08.15°±0.15 S 59.1°±0.15 E pour le flash F1, et 26.81°±0.15 N 09.1°±0.15 W pour F2 (voir section IV pour le détail de la méthode de localisation).

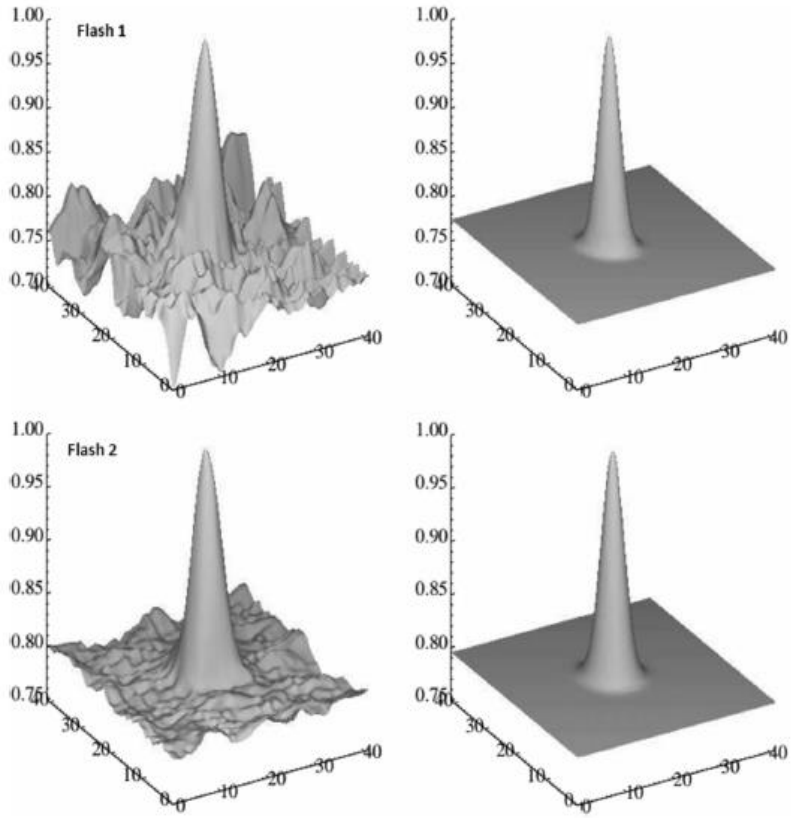


Figure III.16 : *Gauche* Profils des répartitions d'intensités lumineuses correspondant aux pics des flashs 1 et 2. *Droit* Ajustements par moindres carrées sur une forme gaussienne 2D utilisés pour la détermination des centroïdes des flashs (Ait Moulay Larbi et al. 2015a)..

Image vidéo de référence	Colonne	Ligne
Flash1		
sf00030	100.51	195.22
Sf00031	100.11	196.35
Images superposées	100.44	195.56
Flash2		
sf00107	540.56	23.33
sf00108	540.48	23.33
sf00109	540.61	23.04
sf001010	541.23	23.22
Images superposées	540.57	23.26

Tableau III. 4 : Les coordonnées des pixels correspondent aux centroïdes des flashs F1 et F2, pour chaque image où le flash est visible et sur l'image optimale (dont les images sont superposées) (Ait Moulay Larbi et al. 2015).

II.2.1.3. Magnitude Lumineuse

La photométrie est la mesure du flux lumineux (ou intensité) d'une source céleste. Cette technique consiste à calculer la luminosité instrumentale d'une source sur une image, et la convertir en un système standard de magnitude (échelle logarithmique de luminosité). Il existe deux sortes de magnitudes: apparente et absolue. La magnitude apparente est la luminosité perçue par l'œil nu d'un observateur en l'absence de l'atmosphère, tandis que la magnitude absolue est la magnitude d'un objet corrigée à une distance de référence. La magnitude de cette section se réfère à la magnitude apparente V (en visible).

Avant de calculer la magnitude, la luminosité d'un objet est mesurée tout d'abord en flux accumulé par les pixels, ce flux est exprimé en unités d'instrument ADU (Analog to Digital Unit). Dans le cas de notre camera Watec qui génère des images 8-bits, la conversion analogique-numérique donne une valeur du pixel comprise entre 0 et 255 ADU, 0 correspondant à un pixel "totalement noir" et 255 pour un pixel "brillant saturé".

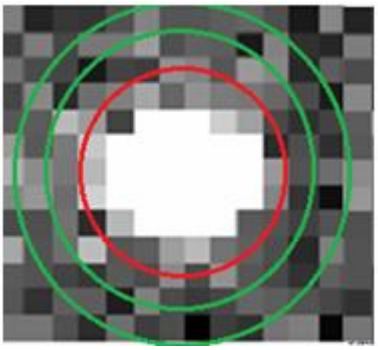


Figure III.17 : Principe de la photométrie d'ouverture. Le fond lunaire est calculé dans la couronne autour de la cible (entre les deux cercles verts), puis soustrait à tous les pixels de l'ouverture (cercle rouge).

Pour calculer la magnitude d'un flash, nous utilisons la technique de la photométrie d'ouverture à l'aide de notre programme développé (basée sur la routine PHOT) sous le logiciel IRAF (Image Reduction and Analysis Facility). La routine PHOT est un outil standard pour la photométrie d'ouverture dans le logiciel IRAF. Après détermination exacte du centre de flash, un cercle défini par ce centre est mis autour des pixels excités. Ensuite, une couronne de cercles interne et externe est spécifiée pour mesurer le fond lunaire (voir figure III.17). La largeur de la couronne est variable selon le cas, et tient compte de l'environnement du flash. La valeur moyenne des pixels dans cette région est considérée comme la luminosité moyenne du fond lunaire. Le flux lumineux d'un flash est calculée après avoir soustraire ce fond de la somme des valeurs des pixels qui se trouvent à l'intérieure de l'ouverture:

$$F_{flash} = F_{flash+fond} - F_{fond}$$

La magnitude instrumentale du flash est calculée ensuite à partir de ce flux en utilisant la conversion logarithmique suivant:

$$Mag_I = -2.5 \times \log(F_{flash})$$

La magnitude instrumentale doit se transformer en magnitude standard par calibration avec des étoiles de références. Pour faire les meilleures calibrations de magnitudes, nous préparons pour toute nuit d'observation une liste des meilleures étoiles de références (de magnitude visuelle, type et couleur spectrale adéquates) qui passeront près du disque lunaire ou qui apparaissent de temps en temps dans le champ de vision pendant la nuit d'observation. En pratique, il n'y pas un nombre suffisant d'étoiles apparaissant dans le champ de vision lors de la surveillance. Nous enregistrons donc quelques images de certaines étoiles de référence à l'extérieur du champ et à proximité de la lune toutes les 30 minutes pendant chaque nuit observation, cela prend 1 min en moyenne pour centrer le champ d'étoiles, enregistrer quelques images, et puis recentrer la lune. Ceci est très important parce que l'étalonnage récurrent avec ces étoiles contribue efficacement à corriger l'effet généré par l'atmosphère (masse d'air, extinction,...). Dans la figure III.18, nous présentons un exemple de champ d'étoiles utilisé pour calibrer les mesures photométriques du flash F2 observé le 14 Avril 2013, une courte séquence d'images a été enregistrée au début de la session d'observation, 10 min avant la détection de flash.

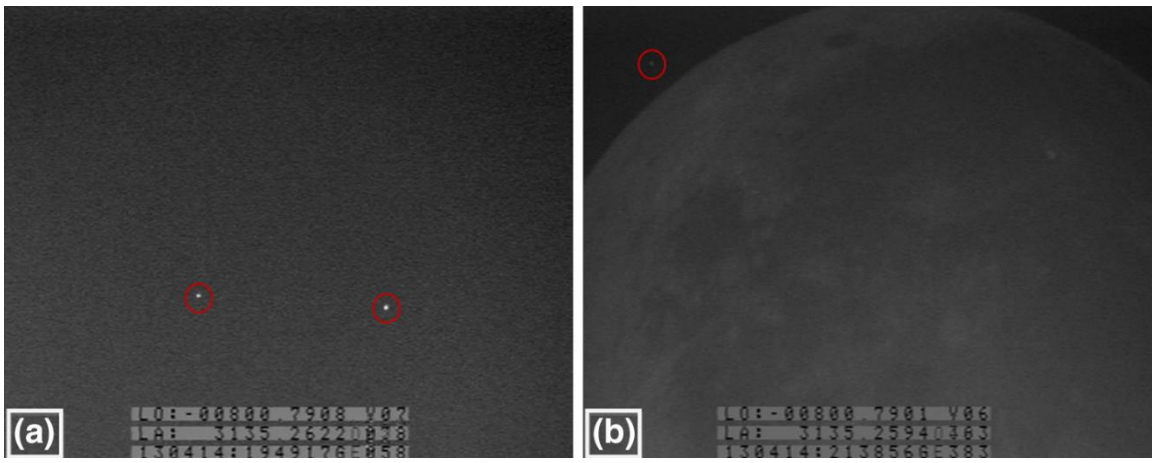


Figure III.18 : Exemple d'images vidéo de quelques étoiles utilisées pour calibrer les mesures photométriques du Flash détectés le 14 Avril 2013, (images avant prétraitement). (a) les étoiles HIP 22672 et HIP 22684 de magnitudes visuelles de 8,7 et 9,4, ce champ a été ciblé à 10 arcmin à l'Est du disque lunaire, 5 min avant le début de l'observation et 10 min avant la détection du flash. (b) étoile de magnitude visuelle 10 apparut dans le champ de vision au cours de la même nuit.

Les magnitudes instrumentales de ces étoiles de référence sont mesurées à partir des images enregistrées en utilisant la photométrie d'ouverture. Leurs magnitudes dans le système standard V sont disponibles dans le catalogue des étoiles Hipparcos. Une caractéristique de réponse de la caméra est obtenue en traçant les magnitudes V, données par le catalogue, en fonction des magnitudes instrumentales des meilleures étoiles enregistrées quelques moments avant et après le flash. Cette loi de calibration est utilisée ensuite pour transformer la magnitude instrumentale du flash en termes de magnitude dans la bande V. En pratique et surtout s'il n y a qu'une seule étoile de classe spectrale adéquate (G, K ou M), on peut utiliser la relation de Pogson. En injectant le flux de l'étoile de référence mesuré en unité instrumentale ADU et sa magnitude V extraite du catalogue, ainsi le flux instrumental du flash dans cette relation, on peut estimer directement la magnitude V du flash observé. Les erreurs engendrées par ces deux calibrations varient entre 0,15 à 0,3mag selon la qualité des étoiles de références utilisées et la qualité des données enregistrées.

Des magnitudes visuelles de 9,4±0,2 et 7,7±0,2 ont été obtenues pour les pics des luminosités des flashs F1 et F2 respectivement. En comparaison avec les durées mesurées, les valeurs des magnitudes et les durées correspondantes des deux flashs sont en accord avec le fait que les flashs les plus brillants doivent être de durées plus longues. Les deux flashs montrent une cohérence avec de la tendance (voir Fig. III.23) établi à partir d'un catalogue de 54 flashs d'impacts compilés par Bouley et al. (2012).

Les magnitudes présentées ici correspondent au pic d'intensité de chaque flash, nous appliquons la photométrie d'ouverture sur chaque image où le flash est visible. La relation de magnitude de Pogson est utilisée pour calculer l'énergie reçue à la Terre au cours de chaque temps d'exposition, ce qui nous permet de reconstituer l'énergie lumineuse visible totale sur la lune, l'étoile Vega est utilisé comme étoile de calibration. Les courbes de lumières sont représentées dans la Figure III.19. Un bref coup d'œil sur ces courbes permet de constater que les événements observés présentent une soudaine augmentation du signal suivie d'une baisse relativement lente. Ces changements de luminosité correspondent parfaitement aux profils typiques des flashs lunaires.

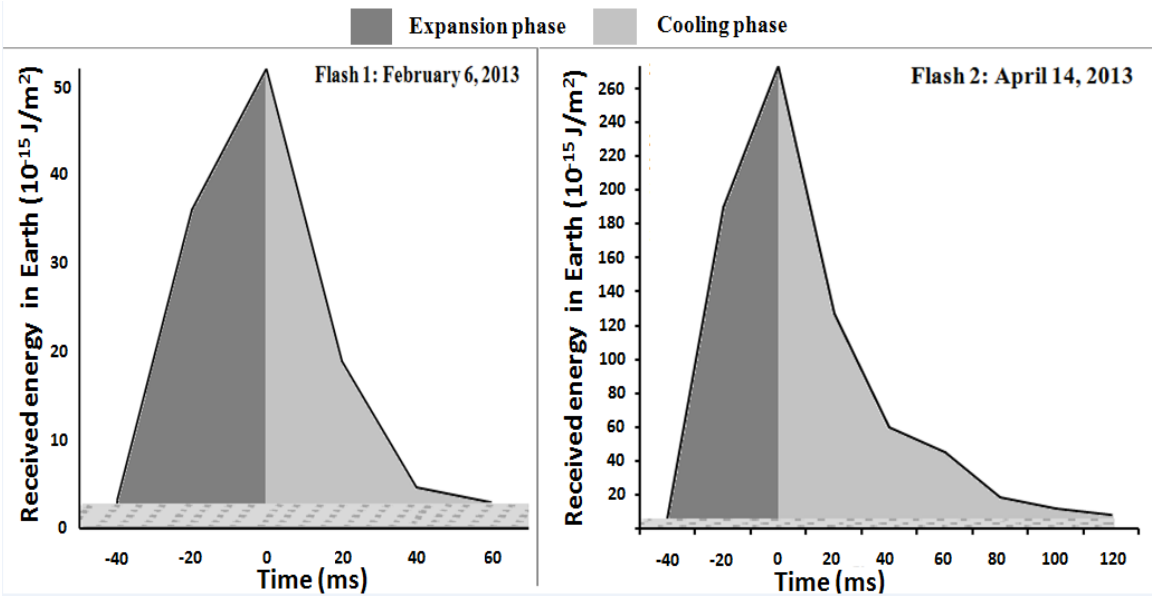


Figure III.19 : Courbes de lumières des flashs observés le 6 Février et le 13 Février 2013, représentées en terme d'énergie reçue sur terre en fonction du temps. La phase de refroidissement est toujours plus longue que celle d'expansion et elle contribue à plus de 60% du rayonnement lumineux total (Ait Moulay Larbi et al. 2013).

II.2.2. Interprétation

Le flash lunaire est un rayonnement lumineux associé à la fusion des matériaux lunaires et ceux du projectile et la formation d'un plume de plasma, puis vapeur, de gouttelettes liquides et de particules solides chaudes impliquant lors de son expansion (Melosh et al. 1993,Clark & Melosh. 1996, Artemieva et al. 2001,Yanagisawa et al. 2006, Bouley et al. 2012). La contribution relative de chaque phase (plasma, vapeur, goutelettes, particules solides) évolue en fonction du temps. L'émission d'un plasma peut dominer les premiers stades, et les matériaux solides ou liquides chauds devraient être dominants à la fin du stade d'expansion et au refroidissement de la plume. Il a été déjà noté que la durée typique des flashs observés est longue devant la durée de la phase plasma, et il semble raisonnable de proposer que la phase plasma ne peut pas être résolue avec les moyens utilisée, même si elle contribue certainement à la première image de chaque flash (Bouley et al. 2012). Il semble donc approprié de considérer que l'émission lumineuse observée correspond à un rayonnement thermique émis par un nuage de gouttelettes de liquide silicaté en contact avec une phase vapeur (la température du flash étant contrôlée pendant la phase de condensation par la température de transition vapeur - liquide). Cette approche a permis à plusieurs équipes de tenter une modélisation simplifiée de l'émission thermique associée au flash sous la forme d'un nuage de gouttelettes liquides en expansion transparent émettant un rayonnement thermique (Yanagisawa & Kisaichi. 2002, Bouley et al. 2012).

Les événements observés depuis nos observatoires apparaissent au moins sur deux images vidéo et montrent des changements de luminosité qui sont typiques des impacts lunaires. Tous les paramètres mesurés (positions, magnitudes et durées), ainsi que les courbes de lumières confirment la nature de nos détections. Ainsi, nos observations peuvent être interprétées selon la séquence d'évolution suivante :

Dans la première phase et juste après la collision, l'onde de choc vaporise le régolite lunaire et le projectile, une portion du nuage vaporisé se trouve ionisé (phase plasma). Initialement, le plume est optiquement épais et l'observation de l'émission lumineuse du nuage au cours de son développement initiale est relativement difficile (Swift et al. 2011). La phase d'expansion du plasma a été modélisée numériquement et devrait être typiquement inférieure à 10 ms (Artemieva et al. 2001). La distinction entre cette phase et la phase ultérieure de refroidissement, généralement plus longue, nécessiterait une cadence (vitesse d'acquisition) plus élevée que celle dont on dispose maintenant.

Le nuage continue à se disperser et devient optiquement mince, la surface radiative augmente jusqu'à ce que l'intensité lumineuse atteigne un maximum (ex : la 2ème image du flash F2). La phase de refroidissement du plume conduit à la condensation des gouttelettes liquides et elle est caractérisée par une diminution progressive de l'émission thermique (proche corps noir) qui correspond par exemple au 3ème, 4ème et à la 5ème image de F2. La durée de cette phase est beaucoup plus longue que la phase d'expansion du nuage de plasma/vapeur. En conséquence, les observations optiques depuis le sol enregistrent principalement l'émission thermique associée à l'expansion d'un nuage de gouttelettes liquides de silicate (voir 2ème, 3ème, 4ème et 5ème zoom sur les images de F2).

La modélisation des émissions d'un nuage de gouttelettes fondues en refroidissement approchées par les radiations d'un corps noir émettant initialement à la température de transition de phases vapeur/liquide produit des rayonnements avec des durées comparables aux observations (Bouley et al, 2012). Les radiations atteignent éventuellement un maximum dans le domaine du proche infrarouge suite au refroidissement vers la température ambiante de la surface lunaire. L'observation de cette phase serait possible, et même idéale en terme de rapport signal sur bruit, en utilisant des caméras en proche-infrarouge, mais aucune observation en IR n'a pu être rapportée à ce jour (malgré également nos efforts dans ce domaine – voir 4ème chapitre de la thèse)

II.3 Le recueil de détections

Après les deux premières découvertes, l'objectif prioritaire est devenu la réalisation des observations couplées en visible et proche infrarouge à l'aide de la camera Watec (Visible) et la caméra InGaAs (proche IR) en utilisant deux télescopes simultanément. Comme montré dans Melosh. 1993 et Bouley et al. 2012, l'analyse des données multi-spectrales permettrait de suivre l'évolution thermique du flash et de confirmer les hypothèses sur l'origine du phénomène (émissions thermiques de corps noir, issues de gouttelettes de silicates fondues).

Jusqu'au Novembre 2015, nous avons accumulé 60 heures de données vidéo de bonne qualité (le calendrier d'observation est dans l'Annexe A). Nous avons réussi la détection de trois autres flashes d'impacts, le 3ème en Novembre 2014, le 4ème en Décembre 2014, et un 5ème flash observé en Novembre 2015. Aucun de ces flashes n'a été observé en IR, les résultats d'observation IR sont décrits dans le chapitre IV.

Les caractéristiques et les paramètres physiques mesurés de tous les flashs observés sont présentés dans le tableau III.5. Les images qui correspondent au pic d'intensité de chaque flash sont représentées dans la figure III.20, et les séquences d'images où les flashs sont observables sont agrandies dans la figure III.21.

	Flash F1	Flash F2	Flash F3	Flash F4	Flash F5
Instant	06-Fév-2013 06h29m56.75s	14-Avr-2013 20h00m45.43s	26-Nov-2014 19h12m02.90s	25-Dec-2014 18h08m43.62s	17-Nov-2015 19h26m37.29s
Durée	60 à 80 ms	160 à 180 ms	120 à 140 ms	40 à 60 ms	40 à 60 ms
Position	08.15°±0.15 S 59.1°±0.15 E	26.81°±0.15N 09.1°±0.15 W	80.0°±0.5 S 2.5°±1 W	28.01°±0.5 S 17.5°±0.5 E	01.53°±0.3 S 37.34°±0.3W
Magnitude	9.4±0.2	7.6±0.2	7.1±0.3	9.6±0.2	9.5±0.2

Tableau III. 5 : Les paramètres mesurés de tous les flashs observés.

Comme montré dans la figure III.23, les magnitudes et les durées de tous ces flashs montrent une cohérence avec la tendance magnitude-durée révélée à partir de la compilation des 54 flashs observés entre 1999 et 2007 dans Bouley et al. (2012) (les flashes les plus lumineux persistent plus). Toutefois, nous notons que l'analyse photométrique indique que le flash F3 est plus brillant que le flash F2, alors que F2 a une durée plus longue. En effet, la tendance observée par Bouley et al. (2012) est interprétée dans le contexte d'une vitesse relativement similaire des différents impacteurs. Un écart à cette loi empirique sera observé pour une vitesse d'impact anormalement élevée (e.g. une comète à 50 km/s ou plus). Dans ce

cas, l'intensité lumineuse sera plus élevée pour un projectile de même dimension mais avec une vitesse plus faible, dont la durée sera voisine. En d'autres termes, l'intensité lumineuse est liée à l'énergie cinétique, tandis que la durée dépend de la taille de l'objet (le temps de refroidissement dépend de la taille). Pour des objets aux vitesses d'impacts proches, la durée et l'intensité lumineuse ne dépendent donc que du paramètre masse, ce qui permet d'observer une tendance durée-magnitude. Des objets très rapides peuvent donc sortir de cette tendance. Cette proposition est confirmée par le travail Bouley et al. (2012), en comparant les impacts corrélées avec les Léonides (qui sont les plus rapides) avec les autres familles des essaims météoritiques. Cela est également en accord avec les interprétations des impacts à grandes vitesses expérimentales réalisées en laboratoires. Nous considérons donc que le météoroïde correspond au flash F3 été plus rapide; alors que le météoroïde à l'origine du flash F2 été plus grand et plus massif. Ceci est cohérent avec le comportement des courbes de lumières (voir figure III.22) : Le flash F2 a nécessité plus de temps au cours de sa phase d'expansion (ce qui peut être directement remarqué dans la courbe de lumière); alors que le flash F3 a rapidement atteint son intensité maximale (qui est plus importante que celle du F2). Puisque c'est cette phase que nous considérons dans le calcul de l'énergie, le flash F2 est plus énergique, généré avec un projectile plus massif.

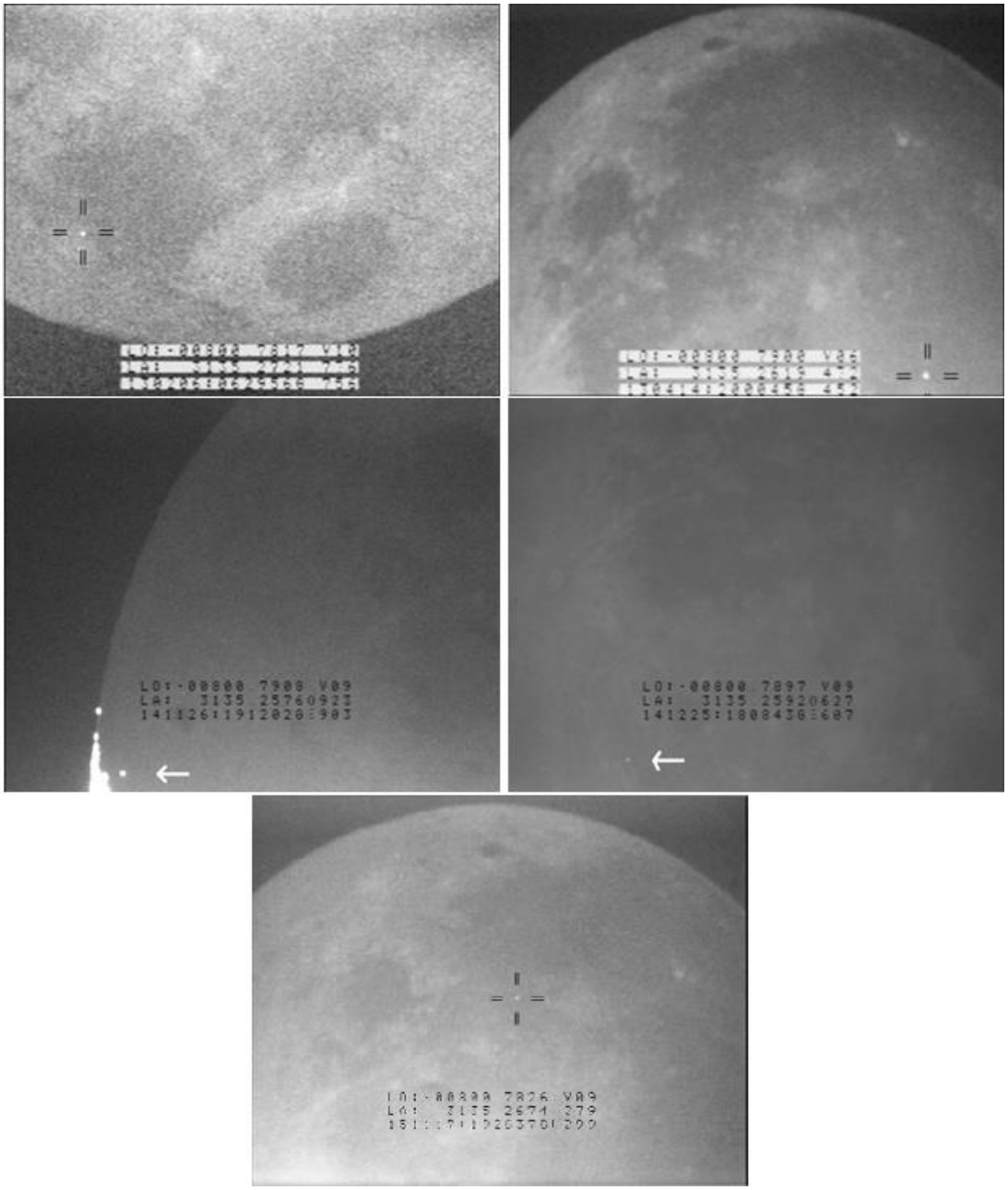


Figure III.20 : Flashs d'impacts observés par nos équipements et détectés automatiquement par LunarScan(Images correspondes aux pics d'émissions).

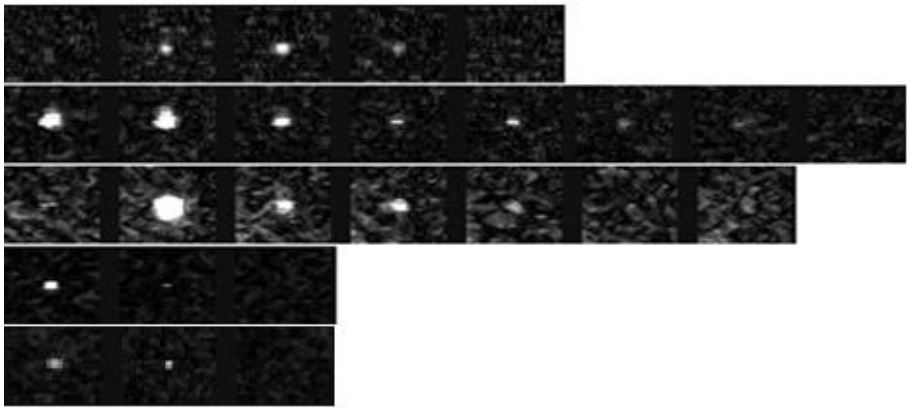


Figure III.21 : Zoom avant sur les séquences d'images où les flashs ont été observés.

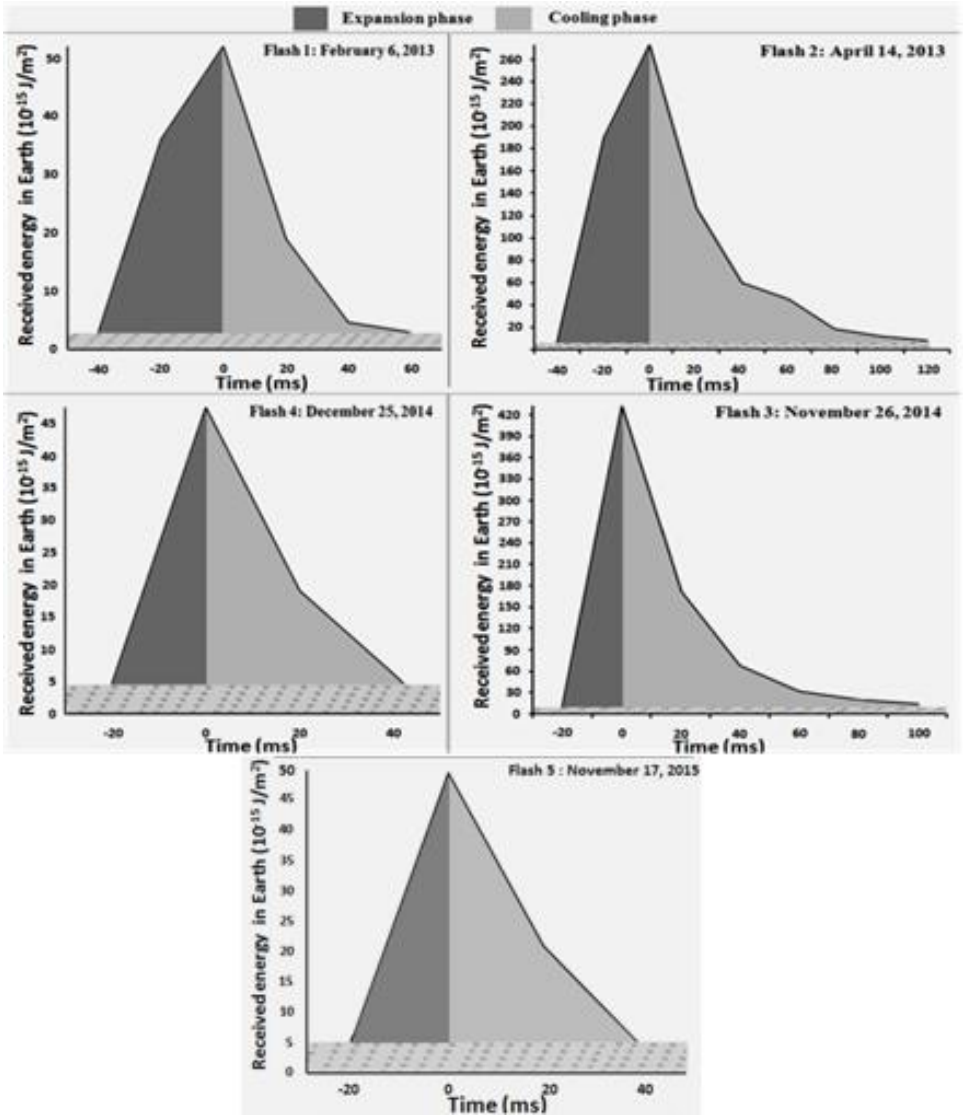


Figure III.22 : Courbes de lumières des flashes observés, énergie reçue sur terre en fonction du temps.

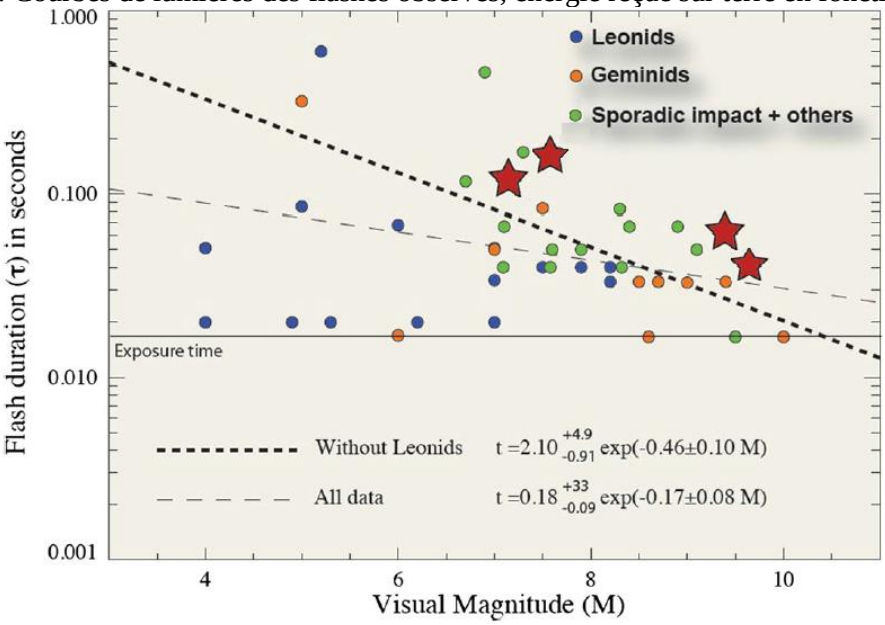


Figure III.23 : Courbe Durée en fonction de magnitude (Bouley et al. 2012) avec les quatre premiers flashs détectés par les télescopes marocains apparaissant comme des étoiles rouges (Ait Moulay Larbi et al. 2015a).

II.4. Paramètres déduits

Les paramètres mesurés de chaque flash observé sont fournis dans la section précédente. Comme signalé précédemment, l'application de la photométrie d'ouverture sur chaque image permet notamment de calculer la quantité d'énergie lumineuse reçue pendant chaque temps d'acquisition. Cette quantité est exprimée en Joule/m^2 est obtenue par application de la formule suivante :

$$E_{L-rec} = t \times F_0 \times 10^{-0.4m}$$

Où t représente le temps d'exposition de la caméra en seconde, m est la magnitude mesurée du flash, F_0=3.75 10^{-8} est le flux en J/s/m^2 d'une source de magnitude 0 dans la bande spectrale de la caméra (400-900 nm) selon (Bessel 1979). Les courbes de lumières de tous les flashs observés sont représentées dans la figure III.22.

L'énergie lumineuse dans la Lune [J] est liée à l'énergie reçue sur Terre par la relation :

$$E_{L-Lune} = f \times \pi \times d^2 \times E_{L-rec}$$

Où f est un facteur décrivant la distribution de la lumière (f = 4 pour l'émission sphérique en 4 stéradians, f = 2 pour l'émission hémisphérique en 2 stéradians), d est la distance en mètres entre la Lune et la Terre qui est égale à 3.84 10^8 m. Nous prenons f = 3, étant donné que le plume se déploie depuis une surface mais elle émet au-dessus de la surface (valeur intermédiaire entre émission sphérique et émission hémisphérique). Les énergies lumineuses résultantes sont estimées entre 45 et 430 KJ.

L'énergie cinétique des impacts est obtenue par conversion de l'énergie lumineuse mesurée sur la Lune en utilisant le concept de l'efficacité lumineuse, ce facteur désigne la quantité de l'énergie cinétique initiale qui se transforme en énergie lumineuse dans les longueurs d'ondes du domaine visible après le choc :

$$E_{impact} = E_{L\text{-}lune}/\eta$$

En supposant un facteur d'efficacité lumineuse égale à 1,5.10^{-3} (Bouley et al. 2012), les énergies cinétiques sont comprises entre 30×10^6 et 287×10^6 Joules. La masse de l'impacteur est alors déduite de l'énergie cinétique d'impact, avec une hypothèse sur la vitesse. Selon les statistiques d'une grande base de données des orbites de petits corps dans l'environnement terrestre (Steel 1996; Ivanov 2001), nous considérons une vitesse de 16,9 km/s valable pour les petits corps sporadiques. Nous avons estimé que les météoroïdes responsables des flashs que nous avons observés auraient des masses comprises 0.15 et 2.3 kg. Ce qui correspond à

des tailles de l'ordre de 5 à 15 cm en diamètres si nous considérons une densité de 3200 kg/m^3 pour les projectiles.

Les diamètres des cratères résultants peuvent être estimés en utilisant la formule de Gault (Gault et al. 1974), cette loi est valable pour les cratères de moins de 100 m de diamètre et ne nécessite que l'énergie cinétique comme paramètre d'entrée, et non pas spécifiquement la masse et la vitesse du projectile. Selon cette loi d'échelle, le diamètre d'un cratère s'écrit comme suit :

$$d = 0.25 \times \rho_p^{0.167} \times \rho_t^{-0.5} \times g^{-0.165} \times E_{impact}^{0.29} \times \sin^{-1/3}\theta$$

En supposant une densité ρ_p=3200 kg/m^3 pour les projectiles, une densité ρ_t=2200 kg/m^3 pour la cible (selon les estimations récentes de la densité de la croûte lunaire et une porosité de surface de 30% (Huang & Wieczorek, 2012), la pesanteur lunaire g=1,62 m/s^2, θ est l'angle d'impact considérée égal à 45° (angle d'impact le plus probable, ce n'est pas la source majeur d'incertitude ici). Les météoroïdes auraient produit des cratères ayant des diamètres compris entre 1.6 et 4.8 m (diamètres de bord à bord).

	Flash 1	Flash 2	Flash 3	Flash 4	Flash 5
Energie lumineuse d'impact (10^4J)	8.2±0.7	43±9.2	35±7.5	4.5±0.5	6.3±0.5
Energie d'impact (10^7J)	5.4±0.5	28.7±6.1	23.1±5.2	3.0±0.5	4.2±0.5
Masse de l'impacteur (kg)	0.38 ±0.1	2.1±0.2	1.1±0.15	0.21±0.05	0.27±0.05
Diamètre de l'impacteur (cm)	6-9	10-15	9-13	4-7	5-8
Diamètre du cratère (m)	2.5±0.5	4.4±0.7	4.2±0.6	1.8±0.3	2.0±0.3

Tableau III. 6 : Les paramètres déduits de tous les flashs observés. Une vitesse de 16 km/s a été considérée dans les calculs (20 km/s pour le flash 3 qui est supposé plus rapide). L'efficacité lumineuse utilisé est 1.5 10^{-3}, les densités utilisées dans le calcul de la taille de l'impacteur et celle du cratère sont 3.1 kg/m^3 et 2.2 g/cm^3 pour le projectile et la cible respectivement.

Le calcul des masses des projectiles et leurs tailles devient précis si les détections sont corrélées avec un essaim de météoroïdes, car dans ce cas la densité du projectile et la vitesse d'impact sont mieux connues. De telles observations contribueront à caractériser la distribution des tailles et particulièrement la taille limite des objets à l'intérieur d'un essaim de météoroïdes particulier.

II.4.1.Les incertitudes

Les incertitudes mentionnées dans le tableau III.6 sont associées aux incertitudes générées par les mesures photométriques seulement et ne tiennent pas compte de l'incertitude de la vitesse d'impact et l'efficacité lumineuse (qui sont en fait la principale source d'erreur à l'heure actuelle).

Le concept de l'efficacité lumineuse joue un rôle très important dans les calculs, et sa valeur dépend essentiellement de la vitesse. Les simulations numériques ainsi que l'analyse de quelques impacts lunaires associés à certaines pluies météoritiques observées dans la dernière décennie indiquent que le facteur d'efficacité lumineuse varie entre 10^{-3} et 2×10^{-3}, et une valeur nominale de 2.10^{-3} a été déterminée à partir des observations des Léonides en 1999 et 2001(Rubio et al. 2000, Artemieva et al. 2001). Cette valeur semble maximale car les léonides sont associées à la comète 55P / Tempel-Tuttle qui suit une orbite très excentrique, et ils heurtent la Lune avec une grande vitesse allant jusqu'à 72 km/s.

Les impacteurs sporadiques sont en général d'origine astéroïdale, leurs orbites sont circulaires, leurs vitesses varient principalement entre 6 et 34 km/s avec une moyenne de 16,9 km/s (Steel 1996; Ivanov 2001). Une valeur d'efficacité lumineuse de l'ordre $1,5\times10^{-3}$ est utilisée pour les projectiles sporadiques, cette valeur a été considérée dans plusieurs travaux. Dans Swift et al. (2011), l'efficacité lumineuse a été caractérisée pour différentes vitesses. Selon ce travail, l'expression de l'efficacité lumineuse en fonction de la vitesse a été approximée par la relation: $\eta = 1.5\times10^{-3}exp(-\frac{9.3}{v^2})$, où v est donnée en km/s. Il a été également signalé dans ce travail que l'efficacité lumineuse approchée par cette formule présente une dérive considérable aux petites vitesses (<15 km/s).

Pour illustrer séparément l'effet des incertitudes de la vitesse et l'efficacité lumineuse, nous présentons dans les figures III.24 et III.25, l'énergie cinétique et la masse attribués au projectile associé au flash F2 que nous avons observé, et ce pour différentes valeurs de vitesse d'impact et d'efficacité lumineuse. La gamme des vitesses considérée est entre 10 et 34 km/s (adéquate pour les projectiles sporadiques). Comme montrer sur la figure III.24, l'énergie cinétique de l'impacteur diminue de $2,8\times10^{8}$ à $2,2\times10^{8}$ Joules, si on considère une efficacité lumineuse de 2×10^{-3} (supposée maximale pour les grandes vitesses d'impact) au lieu de $1,5\times10^{-3}$. Dans ce cas, la masse du météoroïde devient 1,5 kg au lieu de 2,1 kg (figure III.25) en considérant une vitesse d'impact de l'ordre de 16 km/s.

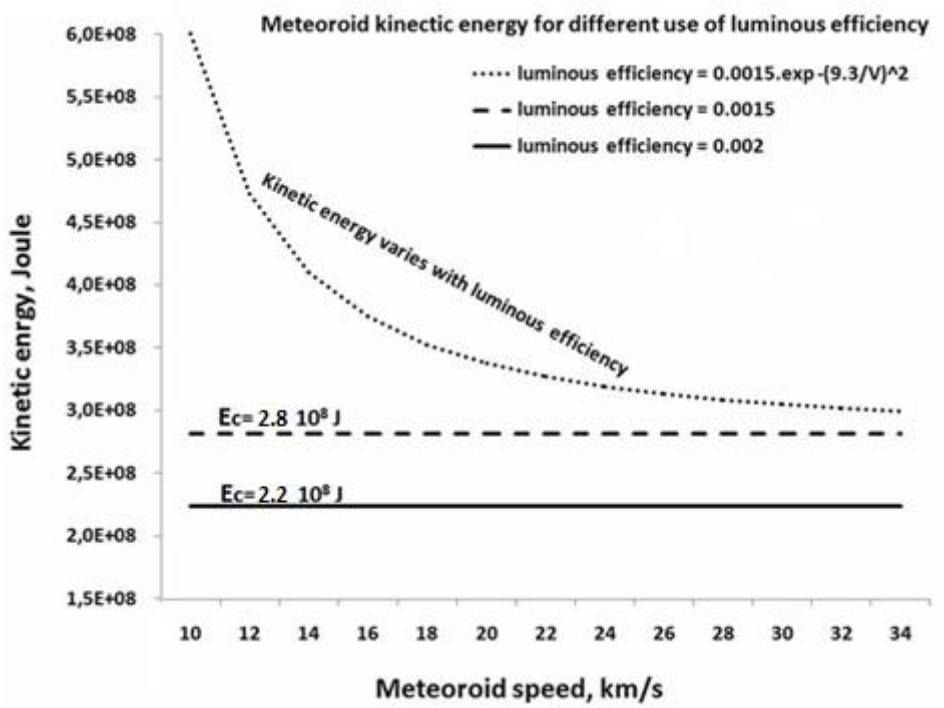


Figure III.24 : *Gauche* L'énergie cinétique d'impact correspondant au flash F2 obtenue en convertissant l'énergie lumineuse visible par l'utilisation des différentes d'efficacités lumineuses (Ait Moulay Larbi et al. 2015a).

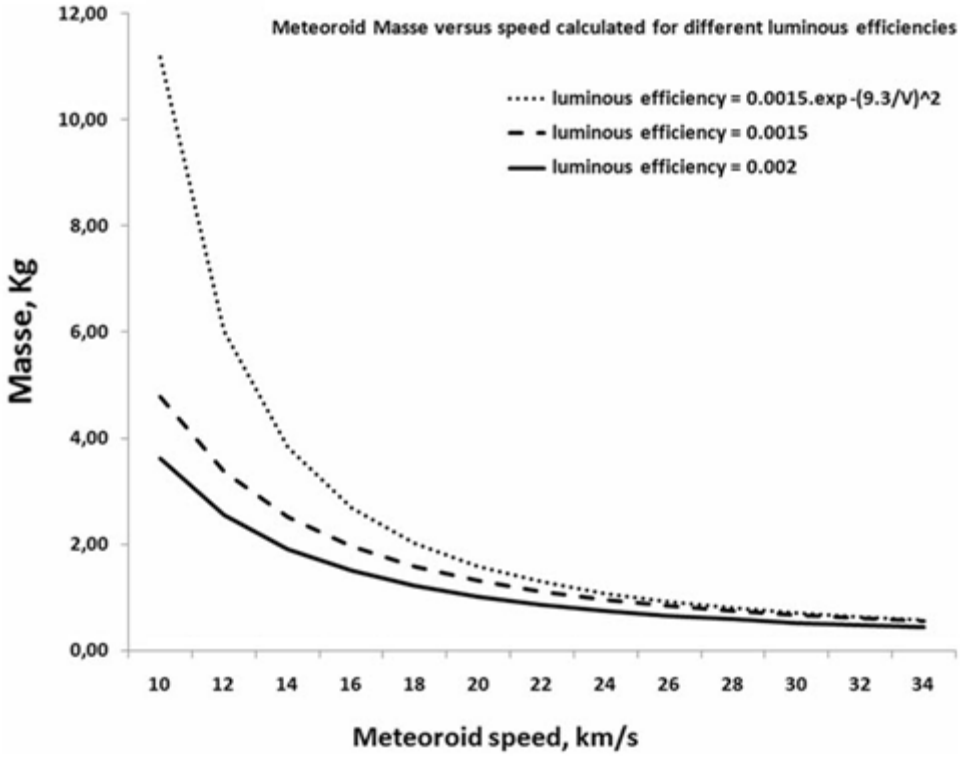


Figure III.25 : La masse du météoroïde correspondant au flash F2 en fonction de la vitesse calculée pour différentes efficacités lumineuses (Ait Moulay Larbi et al. 2015a).

Par utilisation de la relation de dépendance entre l'efficacité lumineuse et la vitesse, donnée dans Swift et al. (2011), la valeur de l'efficacité lumineuse varie entre $6{,}3\times10^{-4}$ à $1{,}4\times10^{-3}$, si nous considérons la gamme de vitesse entre 10 et 34 km/s, ce qui conduit à une énergie cinétique qui varie entre 3×10^{8} et 6×10^{8} J (voir Fig III.24). En utilisant cette dépendance à une vitesse de 16 km/s, et donc une efficacité lumineuse égale à $1{,}1\times10^{-3}$, l'énergie d'impact est de l'ordre de $3{,}84\times10^{8}$ J ce qui donne une masse d'impacteur de l'ordre de 2,8 kg (figure III.25). Donc, à une vitesse de 16 km/s et en tenant compte de toutes les valeurs d'efficacité lumineuse présentés sur les figures, la masse de l'impacteur varie entre 1,5 à 2,8 kg, avec 2,1 kg qui est la valeur qui correspond à l'efficacité lumineuse $1{,}5\times10^{-3}$. En prenant cette dernière valeur comme efficacité lumineuse, la masse de l'impacteur varie entre 600 g et 4,8 kg si nous considérons des vitesses allant de 10 km/s à 34 km/s. Il est à noter que la marge d'erreur de masses devient étroite aux grandes vitesses d'impact, et que la relation de dépendance entre l'efficacité lumineuse et la vitesse donne des valeurs inacceptables à fur à mesure que la vitesse d'impact diminue. L'utilisation d'une efficacité lumineuse de $1{,}5\times10^{-3}$ semble plus raisonnable, et comme on va voir par la suite, elle permet aussi de faire de bonnes estimations en terme du flux d'impact sur la Lune.

A une énergie d'impact donnée, la taille du cratère provoquée par une chute de météoroïde dépend essentiellement de la densité de ce dernier et celle de la cible. Le tableau III.7 montre les diamètres des cratères associés aux flashs F1 et F2 pour différentes densités. Pour le cratère associé au flash F2 par exemple, le diamètre est entre 3,7 m (grande densité lunaire, faible densité d'impacteur) et 5,27 m (faible densité lunaire, grande densité d'impacteur). Le diamètre du cratère dépend aussi et fortement de l'angle d'impact, mais le diamètre du flash F2 par exemple reste dans la gamme 3 à 4,5 mètres si nous considérons les angles d'impacts ordinaires (20° à 80°).

Densité lunaire (g/ cm^3)	Densité du projectile (g/ cm^3)	Diamètre du cratère Flash 1 (m)	Diamètre du cratère Flash 2 (m)
2.2	1.5(Htm)	2.59	4.43
	3.1 (JS)	2.92	5.00
	4.2 (As)	3.07	5.27
2.7	1.5 (Htm)	2.33	4.00
	3.1 (JS)	2.63	4.52
	4.2 (As)	2.77	4.75
3.1	1.5 (Htm)	2.18	3.73
	3.1 (JS)	2.46	4.22
	4.2 (As)	2.59	4.43

Tableau III. 7 : Tailles des cratères correspondent aux flashs F1 et F2 calculée par la loi de Gault pour différentes densités de la cible et du projectile (Htm: Halley type météoroïdes, JS Jupiter sporadiques, As météoroïdes astéroïdales) (Ait Moulay Larbi et al. 2015a).

III. Implication sur le taux d'impact dans le Système Terre-Lune

III.1 Préliminaires

Le flux de petits astéroïdes (météoroïdes : 5 cm< diamètre <50 m) dans l'environnement Terre-Lune est mal connu en raison de la difficulté de leur identification directe dans l'espace par observation télescopiques. Des zones de collecte très grandes sont nécessaires afin de fournir des statistiques raisonnables pour les calculs de ce flux. Le disque lunaire peut être considéré comme un énorme détecteur de météoroïdes dans le voisinage terrestre, dont les zones collectrices permettent d'observer un nombre très important de météoroïdes si les observations sont effectuées régulièrement et à long terme. L'avantage de l'observation des flashs d'impacts, sur la portion sombre de la Lune, par rapport aux observations des bolides (ou fireballs) dans l'atmosphère, est la grande zone de collecte lunaire surveillée par un seul télescope, qui vaut 3 à 8×10^6 km^2 (varie selon le choix du réducteur de focale et la distance entre le capteur est le télescope) et qui est équivalente à dix fois la surface maximale que on peut surveiller dans l'atmosphère avec une camera de type « All-Sky » (caméra capable d'observer l'ensemble du ciel depuis un point de la surface de la Terre). Le taux d'occurrence des impacts sur la Lune est estimé en réalisant des surveillances régulières de la partie sombre du disque lunaire. La durée totale de surveillance et la superficie moyenne surveillée doivent être calculées pour chaque session d'observation. Après une période de surveillance suffisante, le dénombrement des impacts observés permet d'estimer le flux d'impact. Avant d'explorer si les résultats obtenus par nos campagnes d'observations sont conformes aux flux d'impact proposés par d'autres auteurs, nous rappelons brièvement les travaux expérimentaux majeurs ayant estimés le flux d'impact dans système Terre-Lune.

Les impacts météoritiques sur la Lune ont été détectés la première fois sismiquement entre 1969 et 1977 par les sismogrammes installés par les missions Apollo. Parmi 12.000 signaux sismiques enregistrés par ce réseau, un minimum de 1700 événements a été corrélé avec des impacts de météoroïdes de masses entre 500 g et 50 kg (Duennebier et al. 1975). Dans Oberst & Nakamura. (1989), 91 impacts de ces détections ont été localisés et leurs énergies de collisions ont été calculées. Ces impacts ont permis de produire la première estimation directe du taux d'impact sur la Lune, le flux d'impact calculé est:

$$\log_{10} N(E) = 11.38 - 0.99\times\log_{10}(E)$$

Où N est la somme annuelle des impacts lunaires ayant une énergie supérieure à E, et ce principalement dans l'intervalle d'énergies entre 3×10^{11} J et 10^{12} J.

Le flux de météoroïdes dans la gamme de 0,1-10 mètres, est estimé par détections des explosions des météoroïdes dans l'atmosphère terrestre. Halliday et al. (1996) ont utilisé les

détections lumineuses des fireballs par le réseau canadien des caméras all-sky MORP (Meteorite Observation and Recovery Project) pour calculer le flux d'impacteurs dans la gamme de quelques centimètres de diamètre. Tandis que, Brown et al. (2002), Brown et al. (2013) et Silber et al. (2009) ont déterminé ce flux pour les corps les plus grands 'diamètres compris entre 5-20 m', en détectant les ondes acoustiques résultantes de leurs explosions dans la haute atmosphère à partir d'une combinaison de détecteurs installés sur des satellites militaires et de détecteurs infrasons basés au sol. Le flux d'impact donné par l'observation des petits bolides ou fireballs (Halliday et al. 1996) diffère légèrement de celui proposé par la détection des grands bolides (Brown et al. 2002 et 2013 ; Silber et al. 2009). Silber et al. 2009 indiquent également que le flux mené par leurs observations est un peu plus important que celui mené par Brown et al. 2002 et 2013, et celui donné par les observations télescopiques des astéroïdes. Brown et al. 2013 propose qu'un déséquilibre est susceptible d'exister dans la population des météoroïdes. Malgré les désaccords, ces travaux ont permis d'estimer un premier ordre de grandeur du flux présent des météoroïdes.

Concernant l'observation des chutes des météoroïdes sur la Lune, et après avoir effectué 30 heures d'observation lunaire entre 2001 et 2004 depuis l'observatoire de Huelva et Sevilla, Ortiz et al. (2006) ont détecté pour la première fois des flashs d'impacts en dehors des périodes d'activités des pluies météoritiques, ils ont confirmé 3 flashs d'impacts générés par des météoroïdes sporadiques percutant la surface lunaire. En 2007, cette équipe a pu établir un réseau de télescopes semi-automatisés distribués sur 3 observatoires. Ces systèmes sont opérationnels d'une manière quasi-régulière depuis 2009 jusqu'au ce jour là (Madiedo et al. 2014). Ces systèmes ont donné lieu à une dizaine de détections sporadiques, 12 détections corrélées avec la pluie des Perséides (Madiedo et al. 2014), et 9 détections corrélées avec les Geminides (Ortiz et al. 2015) et quelques autres détections. Le flash le plus grand jamais observé a été détecté par ce système le 11 septembre 2013 (Madiedo et al. 2014), de durée incroyable allant jusqu'à 8s, ce flash a du être provoqué par un impacteur de 400 kg, avec une taille estimée entre 60 et 140 cm. Le cratère associé à ce flash a été recherché et observé par la caméra de l'orbiteur LRO, il est de 35 m de diamètre (voir chapitre I).

Le centre MFSC de l'agence spatiale NASA (NASA's Marshall Space Flight Center) a piloté depuis 2005 un réseau permanant de trois télescopes dédiés aux observations régulières de la Lune. Entre Janvier 2006 et Août 2011, le groupe du MEO (Meteoroid environment office) de MFSC a pu observer 252 flashs d'impacts (un moyen de 44 flash/an). Alors que dans la période entre Août 2011 et Octobre 2015, ils ont confirmé 93 flashs d'impacts (un moyenne de 22 flash/an). Cette différence est due au fait que pendant la première période, il y

avait beaucoup de fenêtres favorables d'observation de pluies météoritiques sur la Lune (les phases lunaires adéquates aux observations ont coïncidé plusieurs fois avec les pics de grandes pluies de météores). Parmi les 252 flashs observés dans la première période, plus de 150 (> 60%) événements ont été causés par des impacteurs appartenant à des essaims de météoroïdes (Suggs et al. 2014). Dans la deuxième période, moins de 35 détections (parmi les 93 flashs) ont été corrélées avec les essaims de météoroïdes. En Mars 2013, le groupe de NASA-MFSC a observé un grand flash d'impact de 1 seconde de durée susceptible d'être provoqué par un projectile de ~15 kg.

Dans Suggs et al. 2014, les événements observés dans la première période sont considérés dans le traitement et l'analyse. Il a été signalé dans ce travail que parmi les 252 détections observées durant cette phase, 126 flashs seulement ont été détectés dans les conditions optimales qui permettent des analyses photométriques. Parmi les 126 détections sélectionnées : 47 détections ont été provoquées par des météoroïdes sporadiques, dont 24 sont de très courtes durées et visibles sur une seule image seulement, 16 sur deux images, et 7 flashs visibles sur plus que deux images (Suggs et al. 2014 & MFSC lunar impact database).

III.2 Taux déduits de nos observations

Le flux d'impact sur la Lune est défini comme le nombre d'impacts par unité de temps par unité de surface. Après 56 heures d'observation effectuées entre Janvier 2013 à Décembre 2014 (voir calendrier des périodes d'observations en Annexe A), nous avons observé et confirmé 4 flashs impacts ayant des énergies comprises entre $E_{min} = 3\times10^7$ à $E_{max} = 2.9\times10^8$ Joules. Compte tenu d'une zone de surveillance moyenne égale à $4{,}8\times10^6$ km^2, le flux d'impact lunaire, à une énergie supérieure à E_{min}, mené par nos observations est :$F_L = 1{,}48\times10^{-8}\ km^{-2}\ h^{-1}$. Le nombre cumulatif annuel des impacts sur la Lune à une énergie limite de 3×10^7J (équivalente à une masse de 150 g ou 6 cm de diamètre pour l'impacteur) est donc:

$$F_L\times365{,}24\times24\times37{,}8\ 10^6 = 4.9\ 10^3 impacts$$

Avec$37{,}8\times10^6\ km^2$ qui est la surface lunaire totale, 365,24 est le nombre moyen de jours par année. Le nombre cumulatif annuel des impacts lunaires donné par nos statistiques est présenté dans la figure III.26, nos détections sont illustrées en vert. Les erreurs d'énergies ont été calculées à partir des erreurs de mesure de la magnitude par photométrie d'ouverture et une petite variation d'efficacité lumineuse autour de la valeur $1{,}5\times10^{-3}$, tandis que les erreurs du nombre d'impacts sont calculées sur la base des incertitudes sur les zones surveillées et les durées de surveillance considérées.

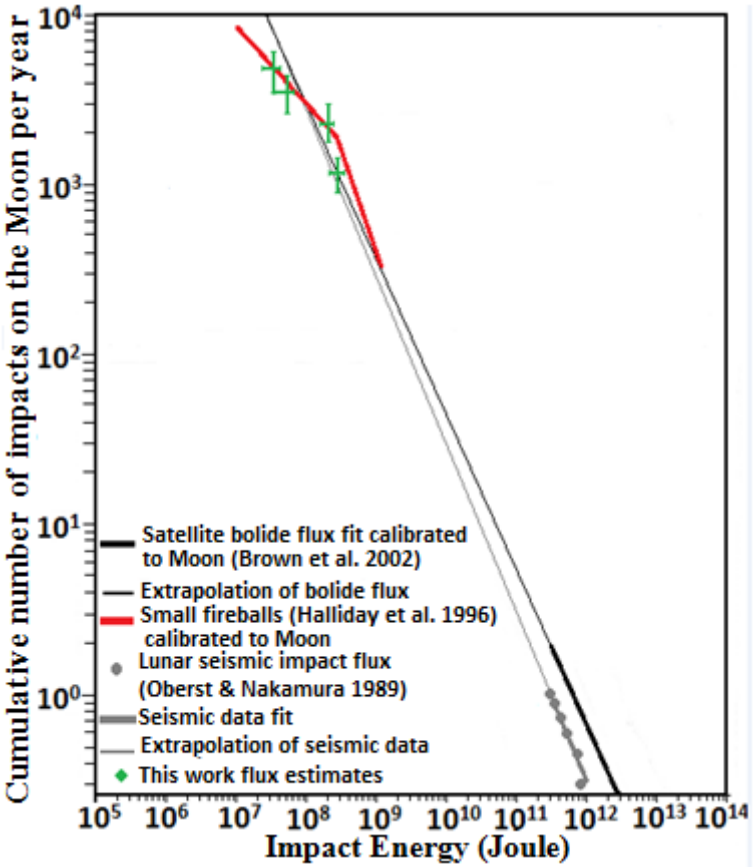


Figure III.26 : Le nombre cumulatif annuel des impacts lunaires donné par les 4 premiers flashs que nous avons observés (en vert) est présenté vis-à-vis le flux mené par observations des bolides convertie en échelle lunaire (lignes rouge et noir) et le flux révélé par les détections sismiques du réseau Apollo (gris) (Ait Moulay Larbi et al. 2015b).

Comme on peut noter dans la figure III.26, nos détections sont relativement en accord avec l'extrapolation du flux d'impact révélé par les détections sismiques des impacts de grands météoroïdes par les sismogrammes d'Apollo (Oberst & Nakamura. 1989). Ce résultat indique qu'il y a une cohérence entre les distributions de populations des petits (<20 cm) et grands météoroïdes (>1 m).

Nous avons converti, en échelle lunaire, le flux trouvé par les observations optiques des petits fireballs et les détections acoustiques des explosions de grands bolides. Malgré la différence entre le flux de données sismiques et le flux des bolides dans l'intervalle d'énergies supérieures à 10^{11} J (où les mesures ont été prises), les deux flux convergent à basses énergies dans l'intervalle des énergies des flashs que nous avons observé. Du coup, nos données sont aussi compatibles avec l'extrapolation du taux déduit de l'observation des grands bolides. En particulier, l'accord est plus favorable avec le flux mené par l'observation des fireballs en suivant ainsi le changement de la pente qui se produit à l'échelle de petites masses. La cohérence du flux mené par nos observations préliminaires avec les autres flux indique la

validité des procédures suivies dans l'analyse et l'exploitation des détections, et en particulier, la valeur d'efficacité lumineuse choisie dans le calcul de l'énergie.

Nos estimations indiquent que sur une surface lunaire de 1 km^2, le taux d'occurrence annuelle d'une chute de météoroïde de taille supérieure à 5 cm est 10^{-4}, et entre 3500 à 6000 cratères de diamètre supérieur à 1.5 m se créent annuellement sur la Lune (sans tenir compte les cratères engendrés par les pluies météoritiques). Ces estimations indiquent également que sur une zone de 4 km^2 qui date 400 Ma, une population de plus de 84000 cratères primaires de diamètre supérieure à 4 m doit être accumulée.

Neukum (1983) a estimé le taux actuel de production annuelle des nouveaux cratères ayant des diamètres entre 1 m et 1 000 m par la loi : log (n) = -3×log(d) + 4,88, où n est le nombre cumulé de cratères qui se produisent chaque année sur toute la surface lunaire avec un diamètre supérieur ou égal à d (exprimé en mètre). L'équation prédit qu'il devrait se produire 12234 nouveaux cratères de diamètre supérieur à 1,5 m chaque année sur la Lune. Ce taux de production est 2 à 3 fois supérieur au taux indiqué par nos observations ainsi que les autres flux mesurés par les autres techniques d'observation, ce qui illustre le rôle des cratères secondaires dans les courbes de production de cratères d'impact basées sur le comptage des cratères sur les surfaces lunaires.

Après estimation du taux d'impacts sur la Lune, le flux d'impact terrestre (F_T) peut être déduit en calibrant le flux lunaire en termes de zone de collecte effective dans l'atmosphère:

$$F_T = F_L \times f_c$$

Où F_T et F_L sont respectivement le flux terrestre et lunaire, f_c est un facteur de correction utilisé pour considérer la surface collectrice effective terrestre affectée par la focalisation gravitationnelle, et qui est définie par :

$$f_c = 1 + 2\left(\frac{GM}{R}\right) \times v^{-2} \approx 1.3$$

G est la constante gravitationnelle, M et R sont la masse et le rayon terrestre (à 100 km d'altitude), v est la vitesse moyenne des impacteurs (16 km/s).

La focalisation gravitationnelle influence également la vitesse de l'impacteur et l'énergie cinétique doit être également corrigée.

$$E_T = E_L \times \left(1 + 2\left(\frac{GM}{R}\right) v^{-2}\right)$$

Ensuite, le nombre cumulatif annuel des impacts sur la Terre à une énergie limite de $4{,}2\times10^{7}$ J (équivalente à une masse de 150 g ou 6 cm de diamètre pour l'impacteur) est donc:

$$F_T\times365{,}24\times24\times510\ 10^{6}=8.6\times10^{4}\ impacts$$

Avec 510×10^{6} est la surface terrestre, F_T est le flux d'impact terrestre, calculé à partir du flux lunaire après correction gravitationnelle.

Les différentes données utilisées pour estimer le taux d'impact terrestre actuel sont représentées sur la figure III.27. Le taux annuel donné par notre surveillance est également représenté dans cette figure en vert.

Comme c'est le cas à l'échelle lunaire, le taux mené par nos détections est relativement en accord avec les détections des petits bolides (ligne rouge) et relativement en accord avec le fit de détection des grands bolides représentées par la ligne noir (Brown et al. 2002).

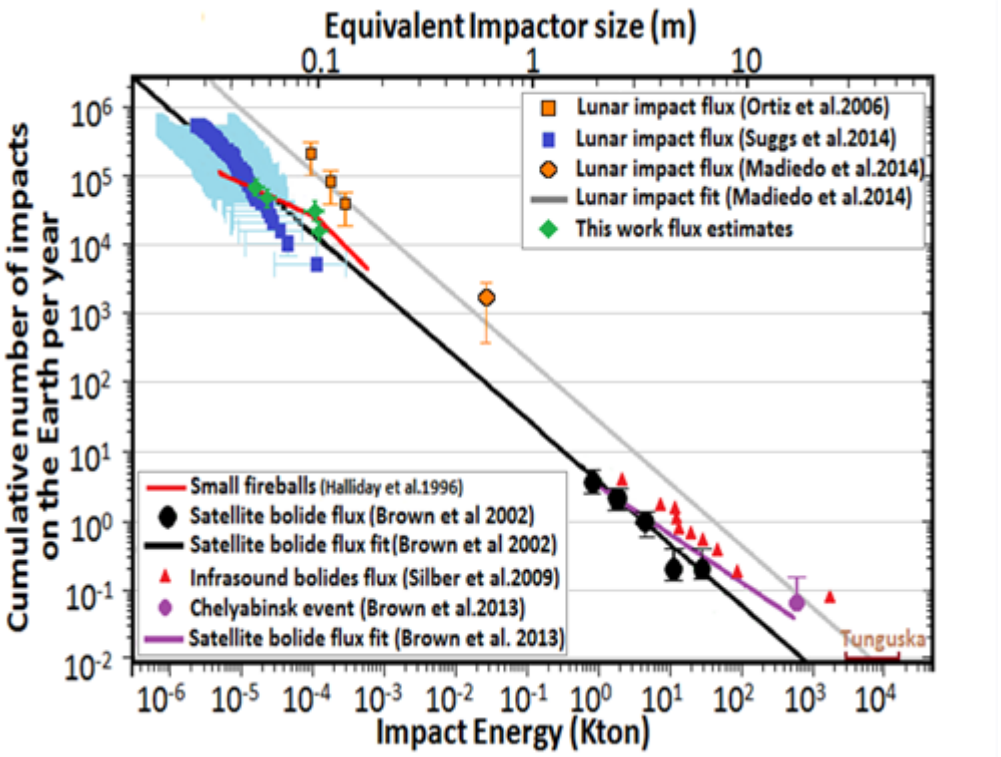


Figure III.27 : Nombre cumulatif annuel des impacts sur Terre. Les détections des bolides de hautes énergies par les détecteurs des ondes de choc et infrasons sont en bas à gauche, les détections des flashs et des fireballs sont en haut à droite. Noter le manque de données entre les deux échelles. La loi de puissance de Brown et al (2002) est la ligne noire. Le flux donné par observation des fireballs est présenté en ligne rouge. Les énergies des flashs lunaires sont converties en termes de champ terrestre : Ceux de NASA-MFSC en bleu, les trois flashs de Ortiz et al. (2006) en carrés orange, les 4 premiers flashs que nous avons observés en vert. Le grand flash observé par Madiedo et al. 2014 est le point orange en milieu de la figure (plage où il manque encore des détections) (Ait Moulay Larbi et al. 2015b).

La loi de puissance donnée par Brown et al. 2002 (ligne noire), qui ajuste les observations télescopiques des petits astéroïdes avec les observations des bolides, a été

retenue dans plusieurs travaux ayant utilisés le flux d'impacts dans le système solaire interne, cette distribution est aussi utilisable dans certaines modélisations numériques pour générer les populations des petits astéroïdes (ou grands météoroïdes). Silber et al. (2009) utilisent les mêmes techniques de détections que Brown et al. (2002) et ils affirment que le taux révélé par les explosions des grands météoroïdes dans l'atmosphère est grands par rapport à celui donnée par les observations télescopiques de petits astéroïdes et celui proposé par Brown et al (2002). Brown et al. (2013) ont réexaminé leurs premières estimations après l'événement de Tcheliabinsk, il est déclaré dans ce papier que le flux de grands météoroïdes dans l'environnement terrestre peut être plus élevé de ce qui a été considéré dans Brown et al. (2002). Le nouveau taux d'impact proposé dans Brown et al. (2013) est schématisé en violet dans la figure III.27. Ce nouveau flux n'est pas convenable avec les observations des petits météoroïdes (proportion centimétrique).

Le flux d'impact mené par observation des impacts lunaires depuis les observatoires américains piloté par l'équipe de NASA-MFSC 'illustré en carré bleu' est compatible avec le flux dérivé par nos détections à basse énergie, mais plus petit d'un facteur de 2 ou plus dans la gamme d'énergie entre 10^8 et $10^9 J$. Avec la même différence à peu près, notre taux est petit par rapport au flux proposé par Madiedo al. (2014) 'illustré par la ligne grise', et qui est basé sur 4 flashs d'impacts sporadiques (Ortiz et al.2006, Madiedo et al. 2014), 3 flashs ordinaires et le grand flash du 11 septembre 2013. Le présent désaccord peut être simplement dû à la différence des approches adoptées pour calculer les énergies d'impacts dans chaque travail, ce qui peut être réduit au minimum dans l'avenir.

Si nous considérons le grand flash observé par Madiedo et al. (2014), et le taux d'occurrence indiqué par des grands événements d'impacts tels que Toungouska et Tcheliabinsk (voir figure III.27), qui sont susceptibles d'être produites par des météoroïdes de diamètres 60-100 m et 17-30 m respectivement (Lyne & Taubar, 1995, Brown et al, 2013), ainsi que d'autres grands événements d'impacts survenus tout au long du dernier siècle, nous constatons que le taux d'impact annuel terrestre présent n'est pas bien contraint, et il est au moins 5 fois plus grand de ce qu'on pense pour les objets de ~1 m et ~10s m de diamètre. A titre d'exemple, les anciennes estimations nous affirment qu'un événement comme celui de Tcheliabinsk se produit 1 à 2 fois toutes les centaines d'années, maintenant et après les dernières observations et découvertes, nous constatons que le taux d'occurrence d'un tel événement sur Terre peut être 6 à 12 fois toutes les centaines d'années (fig. III.27; fig. III.28).

Le taux d'impact indiqué par Madiedo et al. (2014), représenté par la droite grise dans la figure III.27, est considérablement grand par rapport à ce qui est donné par les observations

régulières des flashs d'impacts lunaires ainsi que les fireballs dans l'atmosphère terrestre. Ceci peut être expliqué par le fait que le taux d'impact présenté par Madiedo et al. (2014) est basé essentiellement sur le grand flash de 8s, et il considère qu'un tel impact peut se produire toutes les 300 heures de surveillance lunaire. Toutefois, dans plus de 900 heures d'observation, le flash le plus grand observé par les observations de NASA-MFSC a duré 1s et il était 10 fois moins énergétique que le flash de 8s observé par Madiedo et al. (2014). Le taux indiqué par un tel impact peut être alors plus petit de ce qui est estimé par Madiedo et al. (2014). Le taux d'impact représenté par Madiedo et al. (2014),tient compte du flux trouvé par Ortiz et al.(2006), qui est basé seulement sur 3 impacts sporadiques, illustrés par les carrés en orange, ces événements sont des flashs d'impacts ordinaires à la fois en termes de magnitudes et de durées (courtes), tandis que les énergies et les masses qui ont été attribuées aux impacteurs associés sont très grandes, comme on peut le constater directement sur la figure III.27, en comparaison avec les événements observés par NASA-MSFC et les événements que nous avons observés. De ce fait, les paramètres déduits à partir des événements observés par Ortiz et al. (2006), et plus particulièrement le flux d'impacts, sont considérés surestimés. Des interprétations raisonnables de ces événements ont été recompilées dans Bouley et al. (2012).

Le flux estimé par le groupe NASA-MSFC est plus petit que le flux mené par nos observations et les observations des fireballs, et beaucoup plus petit que celui donné par Madiedo et al (2014). Si nous considérons par exemple le taux d'occurrence annuel des impacts avec énergies supérieures à 10^{-4} kT (4.1 10^{8}J), qu'on peut associer à des météoroïdes de diamètres > à 10 cm. Le flux de NASA-MFSC indique un taux annuel terrestre autour de 5 000 impacteurs, alors que le flux donné par Ortiz et al (2006) et Madiedo et al. (2014) indique plus que 100 000 impacteurs. Le flux estimé par nos compagnes d'observations révèle un taux d'occurrence entre 15 000 et 30 000, ce qui est cohérent avec les observations des petits bolides et des grands bolides 'entre 10 000 et 20 000' (Halliday et al. (1996); Brown et al. (2002) ; Silber et al. (2009). Comme indiqué dans Ortiz et al. (2015), les énergies attribuées aux impacts observés par le groupe de NASA-MSFC sont sous-estimées, une simple comparaison avec d'autres observations permet de constater ce résultat. Comme noté par Ortiz et al. (2015), ceci est probablement dû au filtre optique utilisé dans leurs observations et l'interprétation de la courbe de lumière. Or le flux proposé par le groupe espagnol (Ortiz et al. 2006 ; Madiedo et al. 2014) est essentiellement basé sur les 3 flashs d'impacts observés et étudiés dans Ortiz et al. (2006) et le grand flash exceptionnel examiné dans Madiedo et al. (2014) seulement.

En ajustant une loi de puissance à l'ensemble des flashs observés au Maroc, les flashs observés par NASA-MSFC, le grand flash dans Madiedo et al. (2014), le taux d'occurrence indiqué par les grands événements d'impacts terrestres (Toungouska, Tcheliabinsk,...) avec les données de Silber et al (2009) et Brown et al. (2013), nous obtenons le fit illustré par la ligne verte dans la figure III.28, qui est défini par la loi de puissance suivante :

$$log\ (N)=1.01-0.81\times log(E)$$

Où N est le nombre d'événements avec une énergie supérieure à E (exprimée en kT). Ce flux d'impact est raisonnable et il est cohérent avec les recompilations des détections des grands bolides faites par Silber al. (2009) schématisées en triangles rouges.

Plus de résultats pertinents peuvent être tirés avec plus de bases de données. Les différences entre les différents auteurs sont pour l'instant en effet le résultat d'une statistique basée sur des petits nombres et des durées d'observation trop courtes, avec des évènements de nature exceptionnelle. Avec les bases de données qui continuent de s'enrichir, d'autres extensions de cette recherche peuvent être également envisagées. Des études sur les variations temporelle et spatiale des impacts (Le Feuvre & Wieczorek. 2011) pourraient être achevées. S'il existe des zones potentielles lunaires moins impactées par les météoroïdes, ceci peut être aussi vérifié. La contribution transitoire des pluies de météoroïdes sur le taux de production des cratères pourrait être évaluée avec plus précision. Alternativement, l'utilisation des caméras de haute résolution, 'ex : Lunar Reconnaissance Orbiter', pour identifier les nouveaux cratères créés par les impacts observés est particulièrement intéressante, car l'amélioration des lois d'échelle utilisées dans l'analyse des impacts pourrait grandement accroître la compréhension de la distribution de population des cratères de petites tailles. Ces approches complémentaires permettront aussi la caractérisation du rôle des cratères primaires et des cratères secondaires dans la courbe de production de cratères d'impact, que nous utilisons dans la datation des surfaces planétaires.

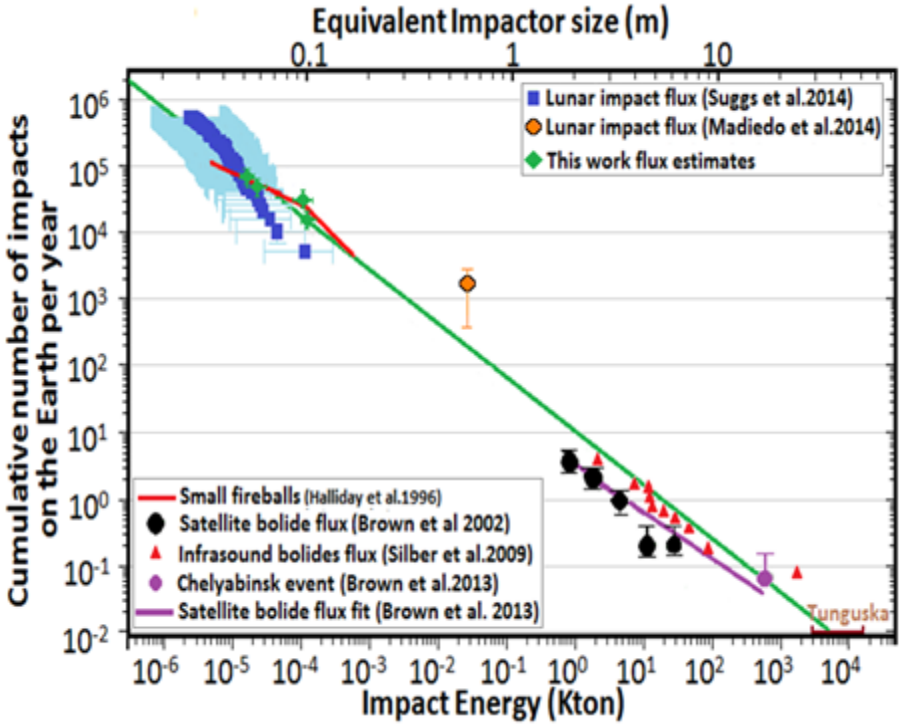


Figure III.28 : Les données présentées dans la figure III.27 ajustée par la loi de puissance proposée à l'issue de ce travail (Ait Moulay Larbi et al. 2015b).

IV. Implications séismologiques et intérieur lunaire

IV.1.Localisation des impacts lunaires

Différentes stratégies peuvent être conçues pour atteindre un positionnement précis d'un impact sur la surface de la Lune. Les flashs sont observés sur la fraction sombre du disque lunaire, ce qui empêche l'identification directe des caractéristiques de la surface lunaire. L'astrométrie précise est nécessaire dans ce cas et exige une modélisation de la configuration lunaire au moment de l'observation et de la distorsion géométrique du système optique. Toutefois, lorsque les observations sont effectuées juste avant ou après la nouvelle lune, ce qui est le cas pour les flashs présentés ici, la lumière cendrée est suffisamment lumineuse pour développer une approche alternative basée sur les caractéristiques de la surface.

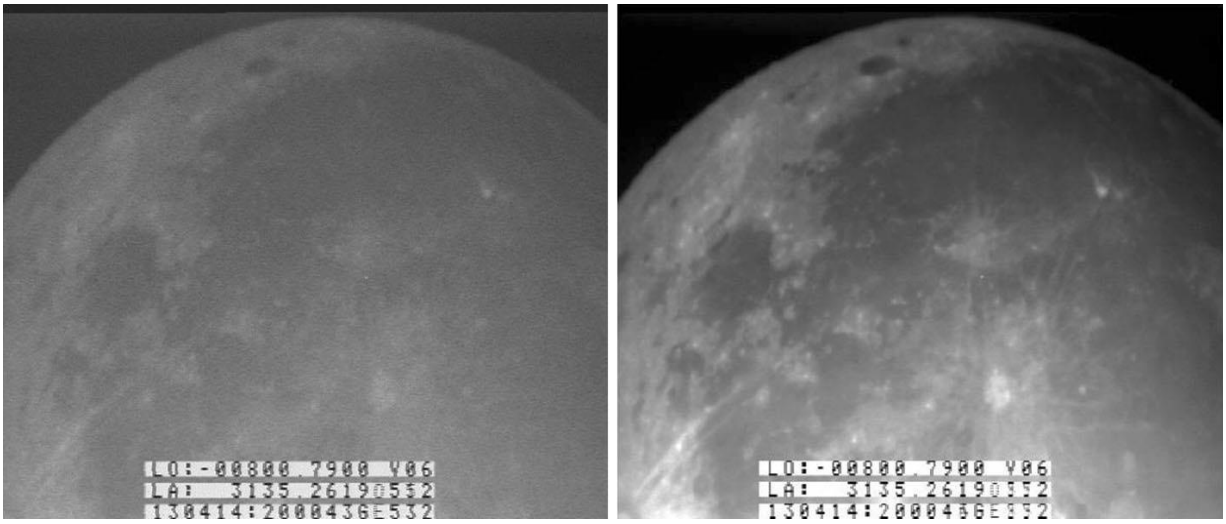


Figure III.29 : *Gauche* Exemple d'une image vidéo (contraste amélioré au maximum). *Droit* Une superposition de 79 images illustrant le bénéfice de l'empilage des images pour l'identification des caractéristiques de surface lunaire qui sont éclairés seulement par la lumière cendrée(Ait Moulay Larbi et al. 2015a).

Il est à noter que les caractéristiques lunaires de grande échelle, telles que les bassins et les grands cratères d'impact, sont facilement identifiables sur les images enregistrées avant et après l'apparition d'un flash d'impact. Dans le but d'augmenter le rapport signal sur bruit et de produire une image optimale de la fraction non éclairée de la Lune, et puisque un grand nombre d'images sont enregistrées, nous empilons après les avoir co-registrées un grand nombre d'images. L'augmentation du nombre d'images superposées peut diminuer à un moment donné la résolution en raison des changements dans les conditions d'observation et la turbulence atmosphérique induisant des distorsions géométriques. Nous avons constaté de

manière empirique, qu'aucune amélioration significative n'est obtenue au-dessus d'une centaine d'images. En raison de suivi imparfait du mouvement lunaire par le télescope, des changements légers dans la géométrie d'observation sont possibles lors de la superposition des images. Les images ont donc été enregistrées à la première image de la séquence choisie (image de base). Le décalage en sous-pixel dans chaque image par rapport à la première image de base a été déterminé en ajustant le pic de corrélation obtenu dans l'espace de Fourier à une gaussienne de deux dimensions selon la méthode décrire par Baratoux et al. (2001). Cette approche est efficace lorsque le décalage attendu entre deux images est à l'échelle sub-pixellaire (Schaum et McHugh, 1996), ce qui est le cas ici. Cette méthode de corrélation et a été appliquée et validée dans une variété de contextes tels que la détection des mouvements de glissements des glaciers planétaires (Casson et al. 2003; Berthier et al. 2005). Après l'application de la procédure sur nos images, les caractéristiques lunaires à petite échelle sont facilement identifiées (Figure III.29).

La précision de localisation des impacts est maintenant limitée par la taille du flash, qui est généralement répartie sur plusieurs pixels. Pour augmenter encore la précision sur le positionnement, le signal du flash est ajusté par une gaussienne de 2 dimension pour chaque image (déjà alignée avec l'image de base) où le flash est présent ainsi que aux cadres accumulés. Le barycentre du flash sur chaque image est défini alors par l'arrondi de la moyenne des centres des fonctions gaussiennes au nombre entier le plus proche. Une image dont le flash est représenté par un seul pixel lumineux est alors générée. Nous notons qu'un décalage possible peut subsister entre le barycentre du rayonnement et la position réelle de l'impact, ce qui est d'une importance décisive pour déterminer précisément la position de la source sismique, et aussi pour la recherche éventuelle de la nouvelle structure 'cratère' produite dans les images lunaires récentes de grande résolution. Ce décalage possible serait le résultat de l'angle de vision du nuage en expansion, et il est maximal à proximité du limbe lunaire, où la résolution des images diminue fortement. Cette question pourrait être résolue en utilisant des observations stéréoscopiques à partir d'observations faites avec des télescopes éloignés avec des distances supérieures à 50 km, ou en examinant à postériori la position prédite et observée du cratère, ce qui permettra de comprendre comment l'altitude du flash perturbe le calcul du positionnement. Les flashs rapportés dans cette étude sont parfaitement situés dans la région centrale du disque lunaire et sont toutefois dans une situation favorable pour le calcul de leur position.

Une fois l'image optimale de la fraction non éclairée de la Lune a été produite, des points de liaisons sont sélectionnés manuellement pour faire un ajustement avec une image à

grande résolution de la pleine lune. Une image de 4304 × 4307 pixels de résolution obtenue à partir d'observations télescopiques depuis la Terre a été choisie à cet effet. Les points de liaisons sont ensuite utilisés pour effectuer une déformation, rotation et translation de l'image optimale selon la même géométrie de l'image de référence à haute résolution.

Ces deux opérations nous permettent alors de distinguer les plus faibles éléments observables dans le voisinage du flash d'impact et de superposer directement les images où il le flash est présent sur l'image de référence à haute résolution. La position du flash peut être alors déterminée sur des images orbitales de la Lune à très haute résolution et disponibles à partir du service Web Google Moon. Les coordonnées sélénographiques sont également lues à partir de ce service. La précision de positionnement est estimée en considérant que le centre de flash est localisé avec une précision d'environ 1 pixel, ce qui correspond à moins de 5 km sur la partie centrale du disque.

IV.2.Application de la méthode

Nous représentons ici l'application de la méthode sur les deux premiers flashs F1 et F2 comme exemples. La répartition spatiale de la luminosité sur les pixels et la fonction gaussienne adaptée aux images optimales des flashs F1 et F2 sont illustrées sur la Figure III.30. Premièrement, le même procédé a été appliqué séparément sur toutes les images dont le flash est visible, et d'autre part sur la superposition de ces images. Un bon ajustement de la fonction gaussienne a été réalisé seulement pour 2 images vidéo pour le flash F1 et 4 images vidéo pour le flash F2. Les coordonnées des pixels estimées pour chaque image vidéo ainsi que pour l'image de superpositions sont donnés dans le tableau III.4. D'une image à l'autre, la différence de positionnement reste au niveau du sous-pixel. Cela confirme que l'incertitude de localisation du flash est toujours meilleure qu'à un pixel.

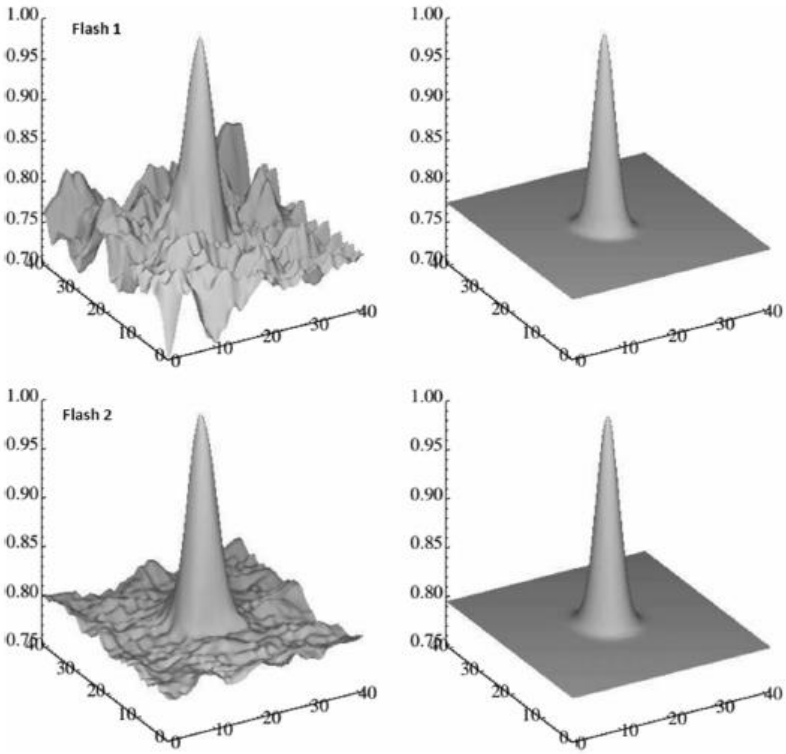


Figure III.30 : *Gauche* Profiles de répartition d'intensités lumineuses correspondant aux pics du flash 1 et 2. *Droit* Ajustements gaussiens utilisés pour la détermination des centroïdes des flashs (Ait Moulay Larbi et al. 2015a).

Les figures III.31 et III.32 représentent les images vidéo où chaque flash atteint son intensité maximale et les images superposées sur lesquelles les positions des flashs, telles qu'elles sont données par le centre de la fonction gaussienne, sont représentées par un seul pixel marqué en rouge. Ces images sont ensuite déformées pour atteindre l'ajustement de l'image de référence de la Lune. Une comparaison finale de la position de ce pixel, marquée en rouge sur l'image de référence, avec l'image à haute résolution de la Lune nous permet de déterminer avec précision la position du flash (figures 33 et 34). En tenant compte de la résolution spatiale illustrée sur la figure III.35 exigée par notre configuration instrumentale, l'incertitude de localisation est meilleure que 5 km si le flash est observé au centre du disque lunaire.

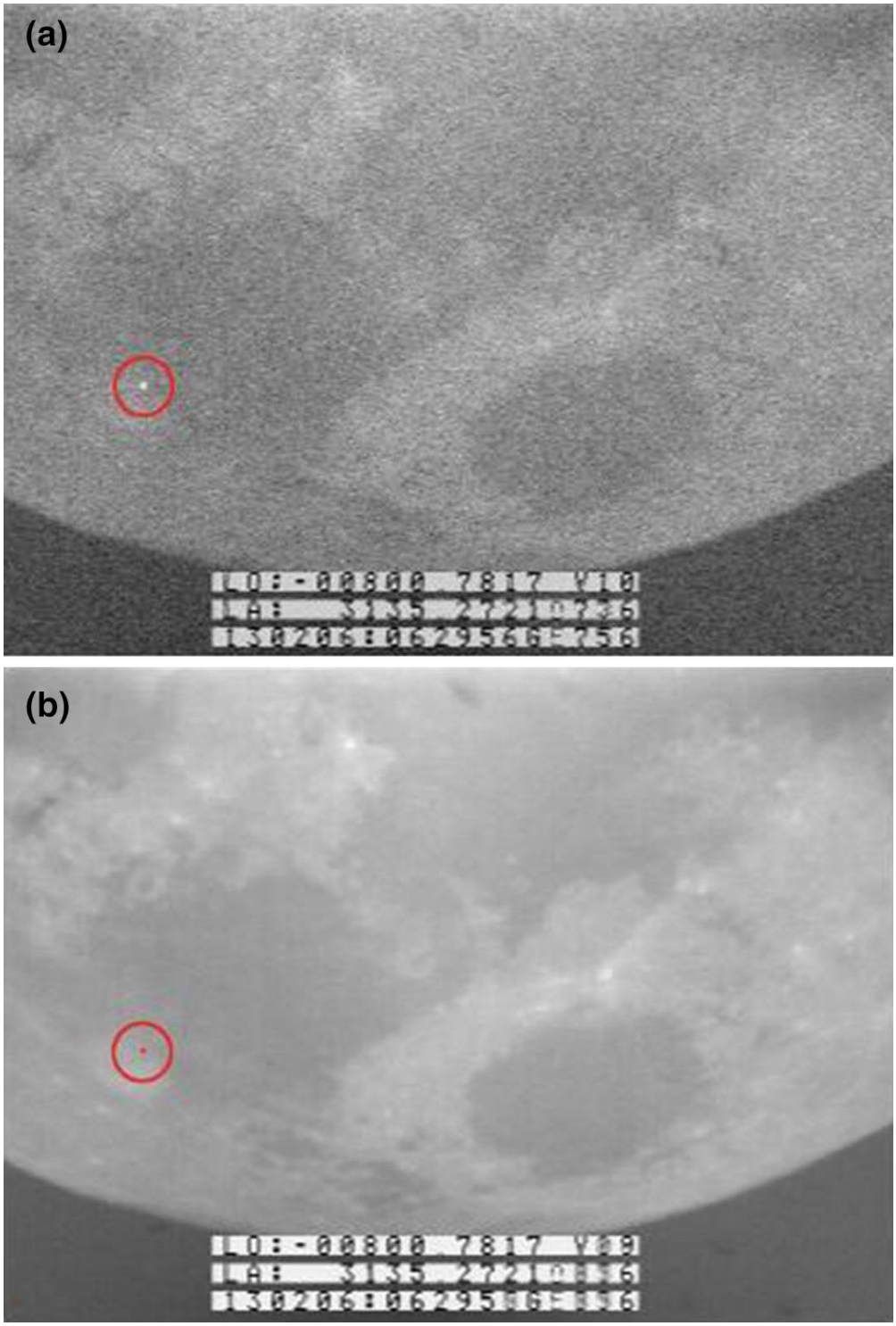


Figure III.31:(a) Image vidéo correspondant au maximum d'intensité du flash enregistré le 6 Février, 2013. Le flash est réparti sur plusieurs pixels. (b) La position du flash est donnée par un seul pixel illuminé et représenté sur les images vidéo empilées (Ait Moulay Larbi et al. 2015a).

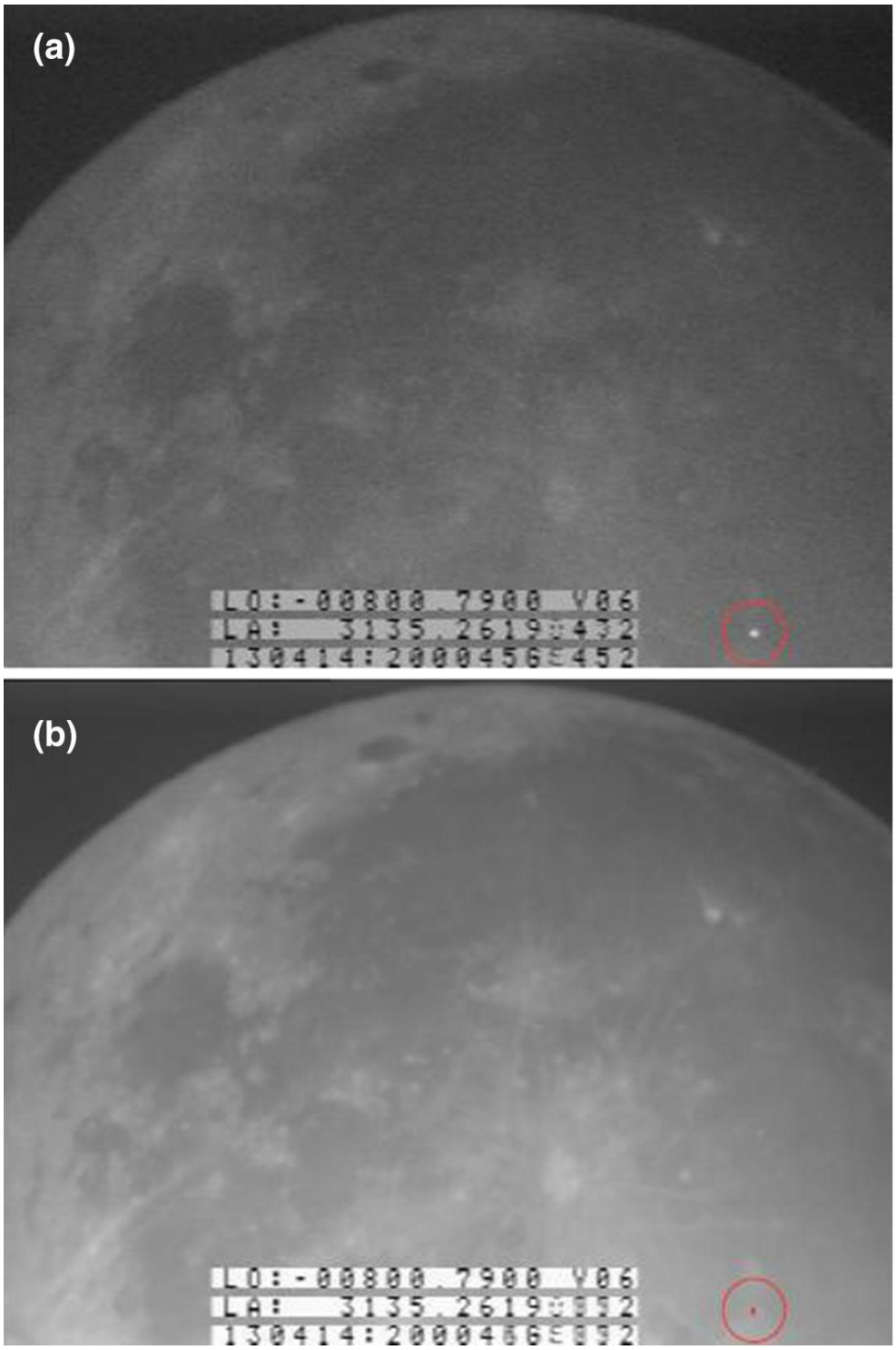


Figure III.32 : (a) Image vidéo correspondant au maximum d'intensité du flash enregistré le 14 Avril, 2013. Le flash est réparti sur plusieurs pixels. (b) La position du flash est donnée par un seul pixel illuminé et représenté sur les images vidéo empilées (Ait Moulay Larbi et al. 2015a).

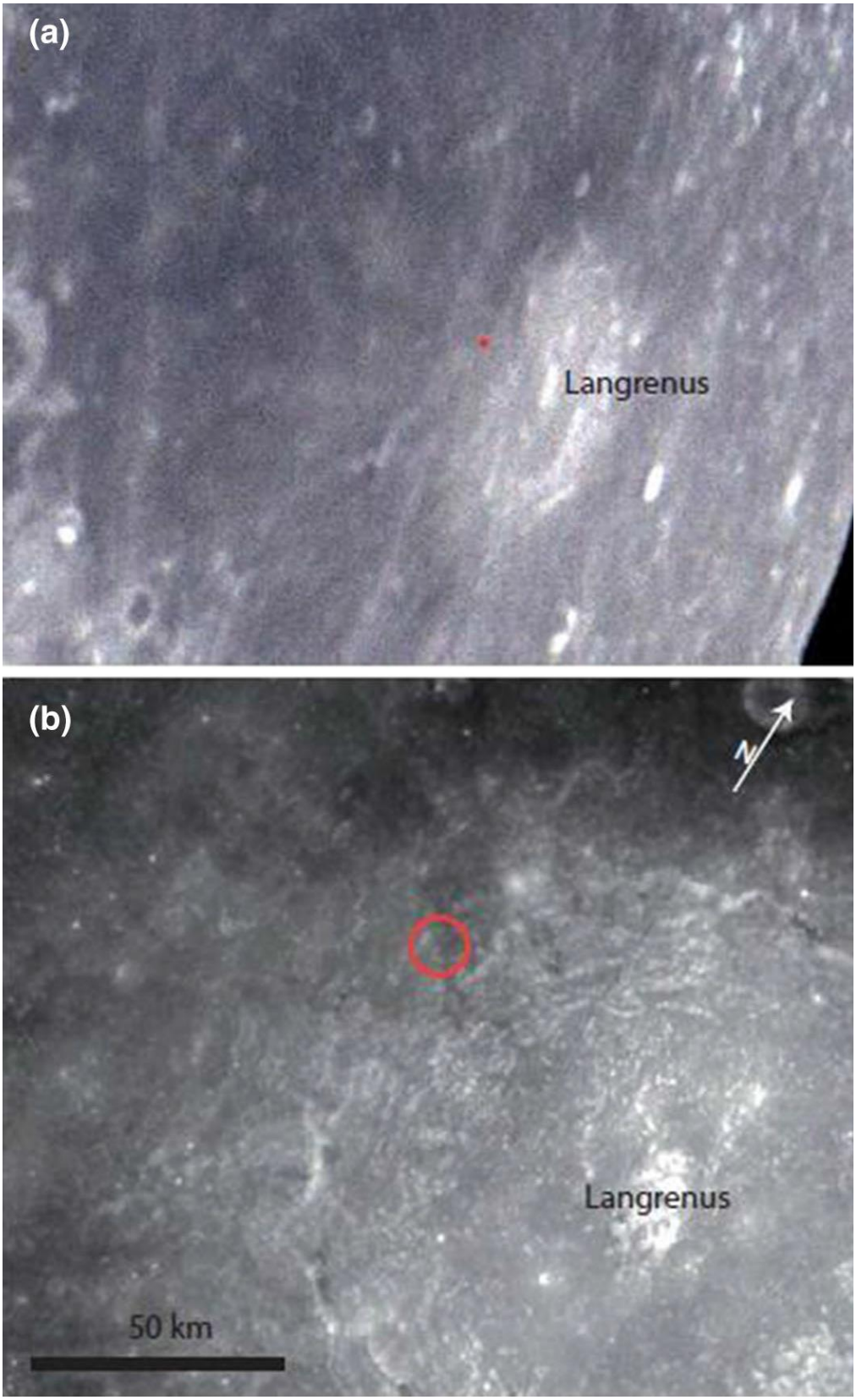


Figure III.33 : (a) Localisation du flash enregistré le 6 Février, 2013 sur une image de référence de la Lune. L'image a été déformée selon la géométrie de l'image de référence de la Lune. (b) Zoom avant sur la position possible du cratère d'impact associé au flash observé. L'image est obtenue à partir d'images de SELENE disponibles à partir du site Web de Google Moon (Ait Moulay Larbi et al. 2015a)

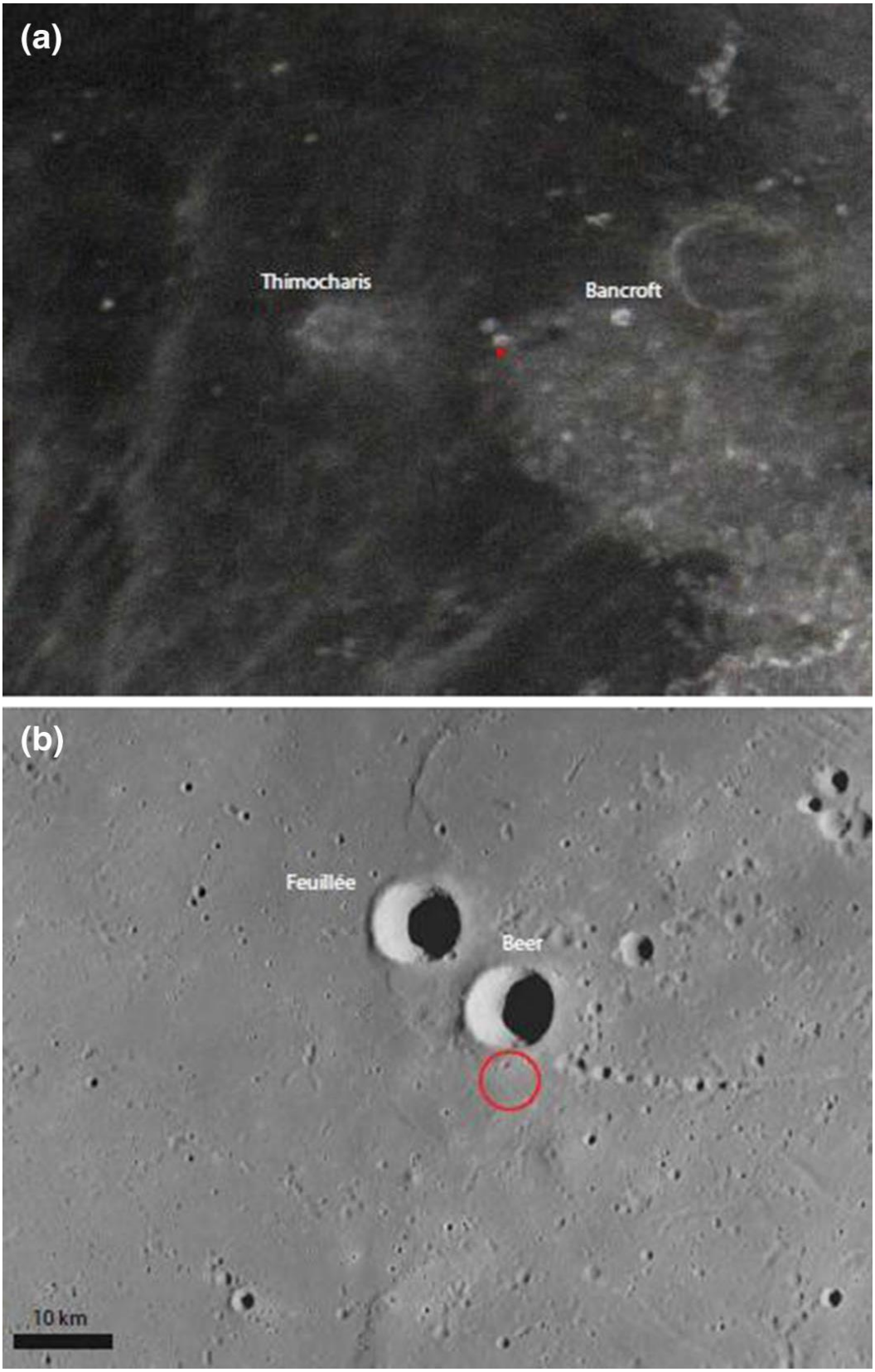


Figure III.34 : (a) Localisation du flash enregistré le 14 Avril, 2013 sur une image de référence de la Lune. L'image a été déformée selon la géométrie de l'image de référence de la Lune. (b) Zoom avant sur la position possible du cratère d'impact associé au flash observé. L'image est obtenue à partir d'images de SELENE disponibles à partir du site Web de Google Moon(Ait Moulay Larbi et al. 2015a).

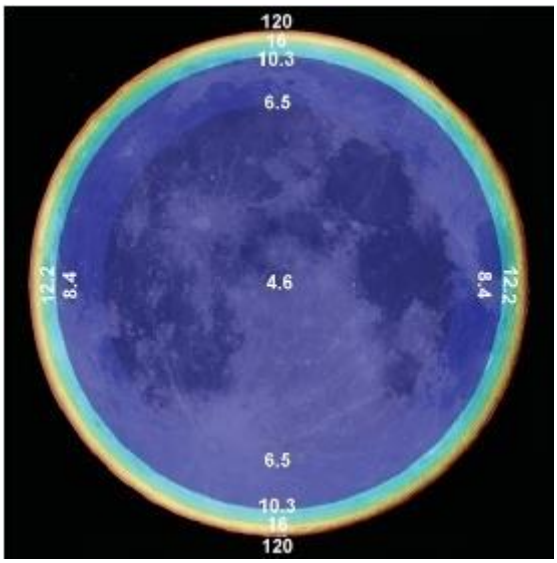


Figure III.35 : Résolution spatiale moyenne sur la surface Lune donnée par la configuration instrumentale utilisée dans nos campagnes d'observations.

IV.3. Implications pour la sismologie lunaire

Comme démontré précédemment par Yamada et al. (2011), la localisation des impacts lunaires va améliorer fortement la caractérisation de la structure de la croûte lunaire après l'installation des futurs sismomètres lunaires. La détermination spatiale et temporelle de point d'impact au profit des futurs sismogrammes lunaires permettra de réduire l'incertitude sur la localisation de la source sismique. En observant l'impact depuis la Terre, la profondeur de la source sismique est déterminée, et en particulier, l'instant de l'impact est connu à mieux que 0,05 s qui est le taux ordinaire d'échantillonnage des sismomètres à large bande. Le tableau III.8 donne les erreurs correspondant au temps de propagation des ondes de volume calculés avec le modèle VPREMOON (Garcia et al, 2011), en considérant une incertitude de distance épicentrale de 5 km (donnée par notre précision actuelle de localisation des impacts) et c'est pour différentes phases.

Onde propagée	10°(s)	30°(s)	60°(s)	90°(s)	120°(s)	150°(s)	180°(s)
P	0.65	0.62	0.52	0.42	0.3	0.15	-
S	1.12	1	0.92	0.72	0.42	0.25	-
ScS	0.03	0.04	0.15	0.2	0.25	0.3	-
PKP	-	-	-	-	0.13	0.11	0.03

Tableau III. 8 : Incertitudes de temps de propagation de ondes sismiques sur la base de 5 km d'incertitude de localisation des impacts, en fonction de la phase sismique et la distance épicentrale (en degrés) (Ait Moulay Larbi et al. 2015a).

Pour une telle incertitude de distance, l'erreur de temps de propagation des ondes sismiques calculée est un facteur de 6 plus petit que l'erreur moyenne de lecture correspond au temps de propagation attribué aux phases d'ondes de volume détectés par le réseau sismologique ALSEP d'Apollo et qui vaut 3 secondes (Gagnepain-Beineix et al, 2006). Cette minimisation d'incertitude permet une investigation précise de la structure interne à partir du temps de propagation de l'onde sismique. En outre, l'observation des flashs d'impacts permet d'estimer l'énergie de la source sismique, ce qui permet de déduire l'atténuation intrinsèque des ondes sismiques et ses variations. Vu que les impacts sont plus facilement détectés par les sismomètres à courtes distances épicentrales, les observations combinées (onde sismique/flash) seraient importantes pour contraindre la structure interne de la croûte lunaire, plus que la structure interne profonde (noyau, etc..).

V. Utilité d'un réseau international

La limitation de la technique d'observation des impacts lunaires consiste au fait que les détections optiques des flashs ne peuvent être réussies que dans la portion sombre du disque lunaire, les observations sont donc limitées aux phases lunaires pendant lesquelles la partie nocturne représente le maximum du disque lunaire. Au cours de ces phases, la lune se trouve presque vers l'horizon (East ou Ouest), soit proche de son lever ou proche de son coucher, et le temps maximal dont nous pouvons profiter est de 4 à 6 heures vers les nuits du premier ou dernier quartier. Vers le premier (ou dernier) croissant le temps moyen de surveillance est voisin de 1 heure par nuit d'observation. Pour accumuler de données suffisantes pour en tirer des bonnes implications statistiques, une longue période de surveillance étalée sur plusieurs années serait donc nécessaire, surtout si les observations s'effectuent depuis un seul observatoire.

Pour augmenter le nombre de détections des flashs d'impacts lunaires, il suffit d'augmenter le temps d'observation en surveillant la surface lunaire depuis différentes longitudes terrestres. L'implantation d'un réseau d'observatoires autour du globe permettrait de bien profiter de la technique d'observation des flashs lunaires. L'avantage d'un tel réseau est illustré dans la figure III.36, cette figure montre l'installation d'un réseau d'observatoires des flashs lunaires dans plus d'une douzaine de pays, il serait donc possible d'observer près de 24h/jour pendant le quartier lunaire et 10h/jour pour une phase de croissant lunaire. Par le développement de ce réseau, la probabilité d'observer un flash chaque nuit devrait augmenter de manière significative. La réalisation d'un tel réseau est très importante dans le contexte

international de préparation aux futures missions sismologiques lunaires qui utiliseront les impacts comme sources sismiques.

Nous proposons donc de créer un réseau de détection autour du globe, en mettant à profit la coopération récente avec l'Université King Abdulaziz d'Arabie Saoudite. Dans le cadre de cette coopération, un télescope a été installé fin 2014 à l'observatoire de l'Oukaimeden. Il est dédié à l'observation du croissant lunaire et l'étude de sa visibilité et son implication sur la précision du calendrier hégirien, le ramadan et les fêtes religieuses. Les collègues saoudiens prévoient de compléter l'installation d'un réseau international de 13 télescopes (dont 4 sont en Arabie saoudite), 100% automatisés à distance, et essentiellement dimensionnés pour les observations lunaires avec le meilleur suivi possible. La possibilité d'utiliser ce réseau au profit d'observation des flashs lunaire existe, et l'accord est déjà établi. Il nous reste maintenant à tester les différents montages possibles pour répondre aux contraintes techniques pour l'observation des flashs lunaires. Comme démontré dans la figure III.37, l'observation depuis l'Arabie Saoudite et le Maroc est idéale pour faire des surveillances complémentaires (vue la différence longitudinale 3h, comparable aux périodes d'observation). Cette opportunité pourrait nous permettre d'atteindre des taux de détection comparables à celles du Meteoroid Environnement Office, en ayant de plus la spécificité de pouvoir réaliser des observations en proche infra-rouge. Cela renforcera notre position pour poursuivre la construction d'un réseau international de télescopes dédiés à l'observation de ces flashs sur quelques heures d'observation par mois.

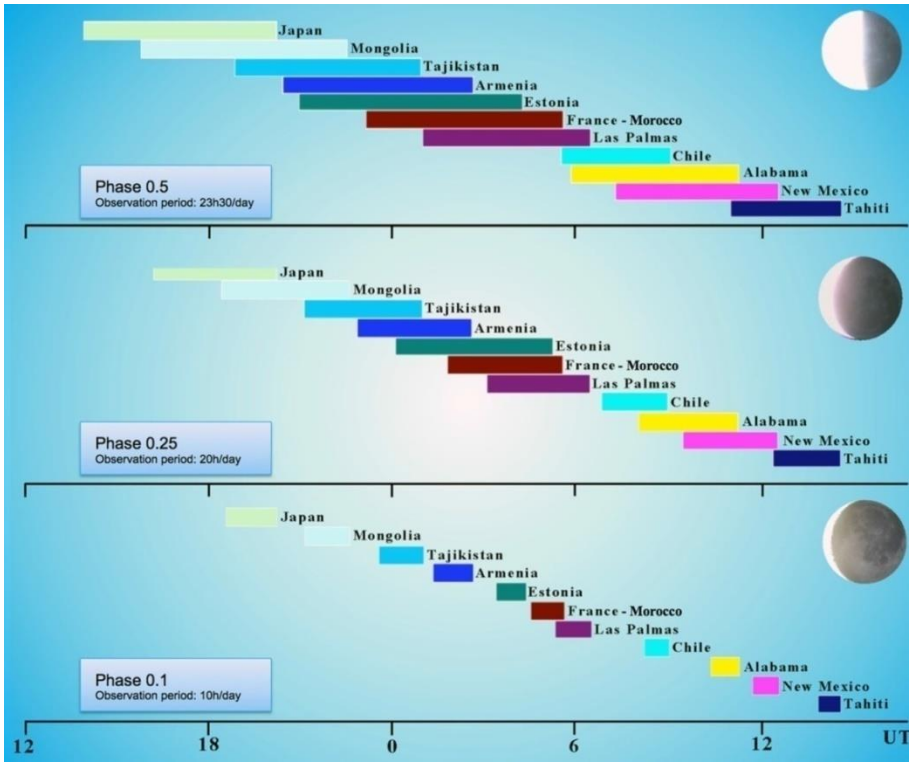


Figure III.36 : Installation des observatoires des flashs lunaires dans plus d'une douzaine de pays. Cette illustration montre que telles collaborations permettront d'observer près de 24 h/jour pendant le quartier lunaire et 10 h/jour pendant le croissant lunaire.

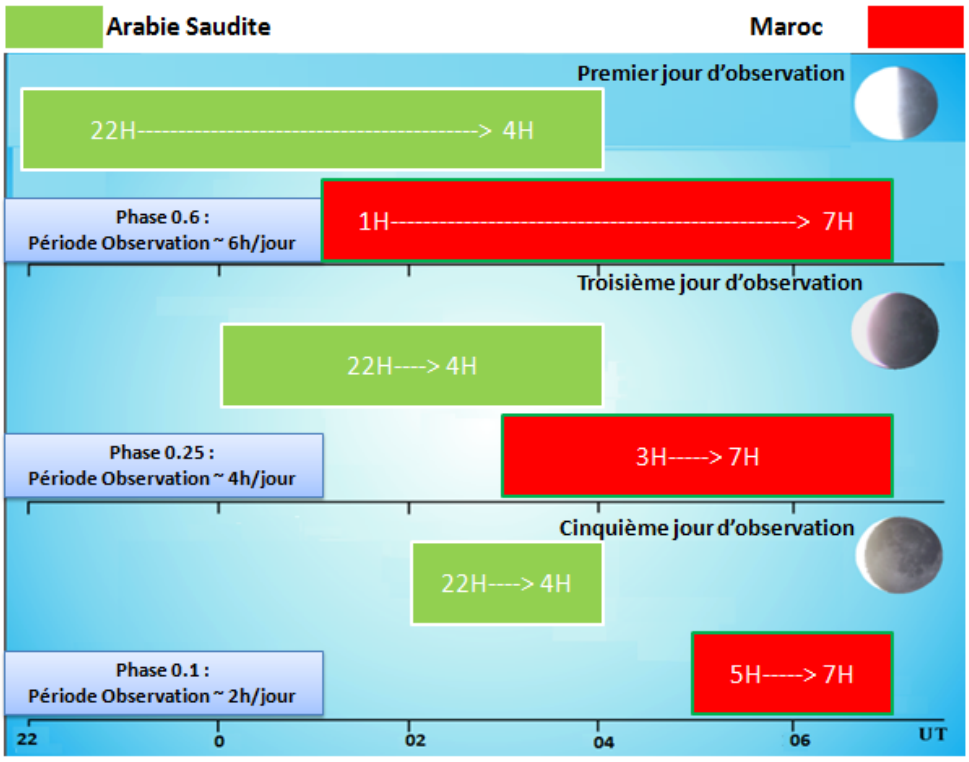


Figure III.37 : Installation des observatoires des flashs lunaires au Maroc et Arabie saoudite. Cette figure illustre que les observations entre ces deux pays seront complémentaires, avec quelques périodes d'observations simultanées qui peuvent être utilisées pour confirmation des flashs candidats.

Références

Ait Moulay Larbi, M. Daassou, A. Baratoux, D. Bouley, S. Benkhaldoun, Z. Lazrek, M. (2013) "First lunar flashes detected from Morocco at AGM observatory of Marrakech", European Planetary Science Congress , UK, id.EPSC2013-333.

Ait Moulay Larbi, M; Daassou, A; Baratoux, ; Bouley, S; Benkhaldoun, Z; Lazrek, M; Garcia, R; Colas, F. (2015a) : First Lunar Flashes Observed from Morocco (ILIAD Network): Implications for Lunar Seismology. Earth, Moon, and Planets,Volume 115,Issue 1-4, pp.1-21.

Ait Moulay Larbi, M. Benkhaldoun, Z. Baratoux, D. Daassou, A. Bouley, S. (2015b), "Lunar impact flashes: Results from 56 hours of video survey data observed by using one telescope", European Planetary Science Congress, id. EPSC2015-702.

Artemieva, N.A. Kosarev, I.B. Nemtchinov, I.V. Trubetskaya, I.A. Shuvalov, V.V. Light flashes caused by Leonid meteoroid impacts on the lunar surface. Sol. Syst. Res. 35, 177–180 (2001).

Baratoux, D. Delacourt, C. Allemand, P. (2001). Digital elevation models derived from Viking images : method and comparison to mola data. J. Geophys. Res. 106(12), 32,927–32,941.

Baratoux, D.; Chennaoui-Aoudjehane, H.; Colas, F.; Benkhaldoun, Z.; Jambon, A.; Leroy, A.; Lognonné, P.; Azagrouze, O.; Ait Moulay Larbi, M. et al. A French-Morrocon Project for the Studies of Impact Processes on the Earth and the Moon. Asteroids, Comets, Meteors 2012. LPI Contribution No. 1667, id.6038

Benkhaldoun, Z.; Rinner, C.; Ory, M.; Daassou, A.; Colas, F. The Morocco Oukaimeden Sky Survey, the MOSS Telescope. Asteroids, Comets, Meteors 2012, LPI Contribution No. 1667, id.6182.

Berthier, E.Vadon, H. Baratoux, D. Arnaud, Y. Vincente, C. Feigl, K.L. Rmy, F.Legresy, B. Surface motion of mountain glaciers derived from satellite optical imagery. Remote Sens. Environ. 95, 14–28 (2005).

Bessel M.S., 1979, Publications of the Astronomical Society of the Pacific 91, 589.NELIOTA: ESA's new NEO lunar impact monitoring project with the 1.2m telescope at the National Observatory of Athens. International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 318, pp. 327-329.

Bouley S., Baratoux D., Vaubaillon J., Mocquet A., Le Feuvre M., Colas F., Benkhaldoun Z., Daassou A., Sabil M., and Lognonné P. 2012. Power and duration of impact flashes on the Moon: Implication for the cause of radiation. Icarus 218: 115-124.

Brown, P. Spalding, R.E. ReVelle, D.O. Tagliaferri, E. Worden, S.P. (2002). The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth.Nature 420, 294–296.

Brown P. and al, (2013a) A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors.Nature 503, 238-241.

Casson, B. Delacourt, C. Baratoux, D. Allemand, P. (2003). 17 years of la clapière landslide evolution analysed from aerial ortho-rectified photographs. Eng. Geol. 68, 123–139.

Clark, R. Melosh, H. 1996. The detectability of lunar impacts in the near infrared.Master's thesis, The University of Arizona, Department of Planetary Sciences.

Duennebier, F, Dorman, J., Lammlein, D., Latham, G., Nakamura, Y.: 1975, Lunar and Planetary Science Conference VI, Houston, Texas, LPI, pp. 2417–2426.

J. Jedediah Rembold and Eileen V. Ryan, (2015) Characterizationand Analysis of Near-Earth Objects via Lunar Impact Observations, Planetary and Space Science, http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2015.05.014

Halliday I., Griffin A. A., Blackwell A. T. (1996) Detailed data for 259 fireballs from the Canadian camera network and inferences concerning the influx of large meteoroids. Meteoritics and Planetary Science, 31, 185-217.

Huang, Q. Wieczorek, M.A. Density and porosity of the lunar crust from gravity and topography. J. Geophys. Res. 117, 5003 (2012).doi:10.1029/2012JE004062.

Ivanov, B.A. Mars/Moon cratering rate ratio estimates. Sp. Sci. Rev. 96, 87–104 (2001).

Gagnepain-Beyneix, J. Lognonne, P. Chenet, H. Lombardi, D. Spohn, T.A seismic model of the lunar mantle and constraints on temperature and mineralogy.Phys. Earth Planet.Inter. 159, 140–166 (2006). doi:10.1016/j.pepi.2006.05.009.

Garcia, R.F. Gagnepain-Beyneix, J. Chevrot, S. Lognonne, P. Very preliminary reference Moon model. Phys. Earth Planet. Inter. 188, 96–113 (2011). doi:10.1016/j.pepi.2011.06.015

Gault, D.E. Greeley, R. Schultz, P.H. A primer in lunar geology. Moffett Field: NASA Ames Research Center (1974), pp. 137–175.

Gural, P. (2007). Automated detection of lunar impact flashes.Meteoroid environments workshop.NASA MSFC, Huntsville, Alabama.

Le Feuvre, M. Wieczorek, M.A. Nonuniform cratering of the Moon and a revised crater chronology of the inner Solar System.Icarus 214, 1–20 (2011) doi:10.1016/j.icarus.2011.03.010

Lyne, J.E. and Tauber, M.E., Nature, Vol. 375, No. 6533, pp. 638-639, 1995

Madiedo, J.M, Ortiz, J.L. Trigo-Rodrguez, J. Moral, M. Cabrera-Cano, J. A large lunar impact blast on september 11th 2013. Mon. Not. R. Astron. Soc. (2014) doi:10.1093/mnras/stu083.

Melosh, H.J. Artemjeva, N.A. Golub, A.P.Nemchinov, I.V. Shuvalov, V.V. Trubetskaya, I.A. Remote visual detection of impacts on the lunar surface. In 24th lunar and planetary institute science conference abstracts (1993), pp. 975–976.

Mimoun, D, Wieczorek, M.A, Alkalai, L., Banerdt, W.B., Baratoux, D., Bougeret, J.L., Bouley, et al. :Farside explorer: unique science from a mission to the farside of the moon. Experimental Astronomy 33, 529-585 (2012).

O. Mousis, et al. Instrumental methods for professional and amateur collaborations in planetary astronomy. Exp Astron 38(1–2), 91–191 (2013). doi:10.1007/s10686-014-9379-0

Neukum,G., 1983 .Meteoriten bombardement und Datierung planetarer. Univ. Munchen,. 186 pp.

Oberst, J.; Nakamura, Y. (1989), A New Estimate of the Meteoroid Impact Flux on the Moon. LPSC volume 20, page 802.

Ortiz, J.L. Sada, P.V. Bellot Rubio, L.R. Aceituno, F.J. Aceituno, J. Gutierrez, P.J. Thiele, U. Optical detection of meteoroidal impacts on the Moon. Nature 405, 921–923 (2000)

Ortiz, J.L. Aceituno, F.J. Quesada, J.A. Aceituno, J. Fernandez, M. Santos-Sanz, P. Trigo-Rodrguez, J.M. Llorca, J. Martn-Torres, F.J. Montan es-Rodrguez, P. Palle, E. Detection of spo- radic impact flashes on the Moon: implications for the luminous efficiency of hypervelocity impacts and derived terrestrial impact rates. Icarus 184, 319–326 (2006). doi:10.1016/j.icarus.2006.05.002.

Ortiz, J. L. Madiedo, J. M. Morales, N. Santos-Sanz, P, Aceituno, F. J. (2015). Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 454, Issue 1, p.344-352.

Rubio, L.R. B. Ortiz, J.L. Sada, P.V. (2000a). Luminous efficiency in hypervelocity impacts from the 1999 lunar Leonids. Astrophys. J. 542, L65–L68. doi:10.1086/312914.

Silber E. A., ReVelle D. O., Brown P. G., Edwards W. N. (2009) An estimate of the terrestrial influx of large meteoroids from infrasonic measurements. Journal of Geophysical Research, 114.

Steel, D. (1996). Meteoroid orbits. Sp. Sci. Rev. 78, 507–553.

Suggs, R. Moser, D. (2013). Lunar meteoroid impact monitoring for LADEE. Lunar meteoroid impacts and LADEE mission workshop.

Suggs R. M., Moser D. E., Cooke W. J. and Suggs R. J. (2014) the flux of kilogram-sized meteoroids from lunar impact monitoring. Icarus, 238, 23-36.

Swift, W.R. Moser, D.E. Suggs, R.M. Cooke, W.J. (2011). An exponential luminous efficiency mode for hypervelocity impact into lunar regolith. In Proceedings of the meteoroids 2010 conference, NASA CP-2011-216469. pp. 116–124.

Yamada, R. Garcia, R.F. Lognonne, P. Feuvre, M.L. Calvet, M. Gagnepain-Beyneix, J. (2011). Optimisation of seismic network design: application to a geophysical international lunar network. Planet. Sp. Sci. 59, 343–354. doi:10.1016/j.pss.2010.12.007.

Yanagisawa, M. Kisaichi, N, (2002). Lightcurves of 1999 Leonid impact flashes on the Moon. Icarus 159, 31–38.

Yanagisawa, M. Ohnishi, K. Takamura, Y. Masuda, H. Sakai, Y.Ida, M. Adachi, M. Ishida, M, (2006). The first confirmed Perseid lunar impact flash. Icarus 182, 489–495 doi:10.1016/j.icarus.2006.01.004.

CHAPITRE IV

Observation des flashs lunaires dans l'infrarouge

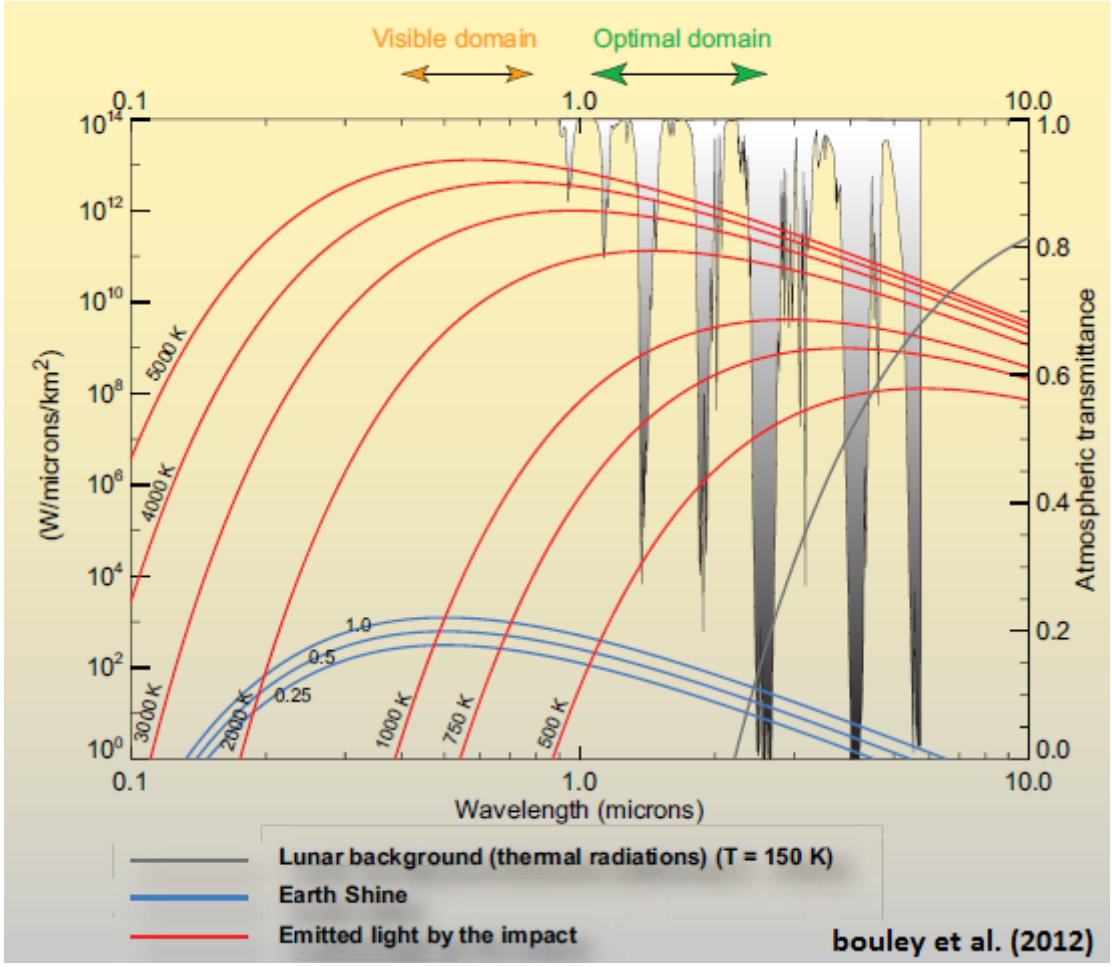


Figure présentée en chapitre II

Contenu

Introduction 151
I. Instrumentation et Observation 151
II. Résultats et discussion 157
III. Conclusion 163
Références 164

Introduction

L'observation du ciel dans le domaine infra-rouge est rendue difficile par l'opacité de l'atmosphère dans ce domaine de longueurs d'ondes. Cependant, l'observation des flashs lunaires dans le proche infrarouge est scientifiquement pertinent pour la compréhension du phénomène lumineux, et pourrait aussi permettre à terme d'observer un plus grand nombre de flashs. En effet, le rapport entre le signal émis par un flash, et le rayonnement émis par la surface lunaire est plus élevé dans cette gamme de longueur d'onde où la composante lumière solaire réfléchie décroit, tandis que les rayonnement thermique est encore faible, comme suggéré par Clark et Melosh 1996, et Bouley et al. 2012. On s'attend également à ce qu'une partie importante de l'énergie du flash lunaire soit rayonnée dans ce domaine, lorsque la température des particules liquides ou solides décroit et que le maximum du rayonnement de corps noir devient celui du domaine infrarouge (> 1 microns). Cette phase de refroidissement s'étend dans la durée, et il semble également possible d'observer un flash plus longtemps dans ce domaine, que dans le domaine visible, comme nous allons le voir.

Fort de ces arguments théoriques, nous avons donc tenté de réaliser les premières observations de flashs lunaires dans le domaine proche infra-rouge. Ce chapitre récapitule les résultats préliminaires de ces séances d'observation. Nous représentons les caractéristiques de l'expérience, du système optique et capteur utilisés pour réaliser ces observations, ainsi que la procédure spécifique suivie. Les premiers essais effectués dans nos observatoires nous ont permis d'imposer quelques contraintes générales sur les caractéristiques optimales du capteur IR (infrarouge), qui influencent en particulier la résolution spatiale et le champ de vision.

I. Instrumentation et Observation

I.1. Spectre infrarouge et bandes d'intérêt

L'utilisation du rayonnement infrarouge en astronomie s'est très largement répandue pour de nombreuses applications scientifiques. L'observation infrarouge depuis le sol reste difficile essentiellement à cause de notre atmosphère, opaque dans ce domaine. Néanmoins, grâce aux progrès des nanostructures au cours de ces dernières années, le développement réalisé dans l'optoélectronique a donné lieu à de nouvelles approches et méthodologies de conception des capteurs infrarouges. Des performances améliorées peuvent être atteintes

actuellement dans l'astrophysique observationnelle, y compris les observations depuis le sol terrestre.

Le mot «infrarouge» fait référence à une large partie du spectre électromagnétique qui couvre une plage de longueurs d'ondes de 1,0 µm à 30 µm et au delà (tout ce qui est entre la lumière visible et le rayonnement de micro-ondes). Une grande partie du spectre infrarouge n'est pas utile pour observation télescopique depuis le sol, car le rayonnement est bloqué par l'atmosphère. Les parties restantes du spectre sont souvent appelées «fenêtres de transmission atmosphérique». Comme le montre la figure IV.1, le spectre infrarouge est segmenté en proche infrarouge (NIR, 0.8-1µm), infrarouge court (SWIR, 0.9-2.5µm), infrarouge moyen (MWIR, 3-5µm), infrarouge long (LWIR, 8-14µm), infrarouge très long (VLWIR, 12- 25µm) et infrarouge lointain (FIR > 25µm).

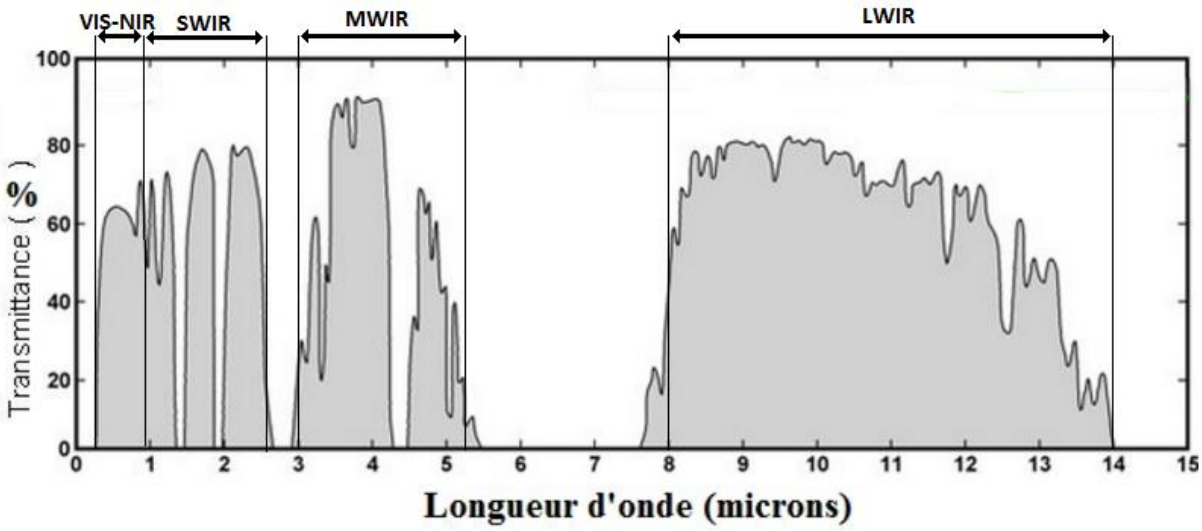


Figure IV.1 : Bandes spectrales infrarouges et fenêtres de transmission atmosphériques du rayonnement électromagnétique (modifié à partir de Loubere. 2012).

Selon la loi de Wien, plus un objet est chaud, plus son rayonnement thermique sera important vers les courtes longues d'onde. La puissance rayonnée par un corps noir de température 300 K est maximale à une longueur d'onde d'environ 9,7 µm (dans l'infrarouge long, qui correspond au domaine utilisé par les « caméras thermiques » commerciales). Pour une source portée à 3000 K, le pic de rayonnement se trouve à 0,97 µm, dans le proche infrarouge. Le développement des capteurs InGaAs et HgCdTe a encouragé les observations depuis le sol dans une bande spectrale qui constitue le pont entre les bandes visibles et thermiques dans le spectre électromagnétique, à savoir : NIR et SWIR (0,9 à 2,5 µm). Les bandes spectrales Y, J et H du proche infrarouge (NIR) et infrarouge courte (SWIR) sont présentées dans la figure IV.2, ces bandes s'étendent entre 900 nm à 1700 nm et représentent des « fenêtres » atmosphériques qui sont essentiellement transparentes. Les observations

infrarouges dans cette bande spectrale sont enregistrées et analysées comme des images obtenues dans le visible, avec des sorties vidéo numériques.

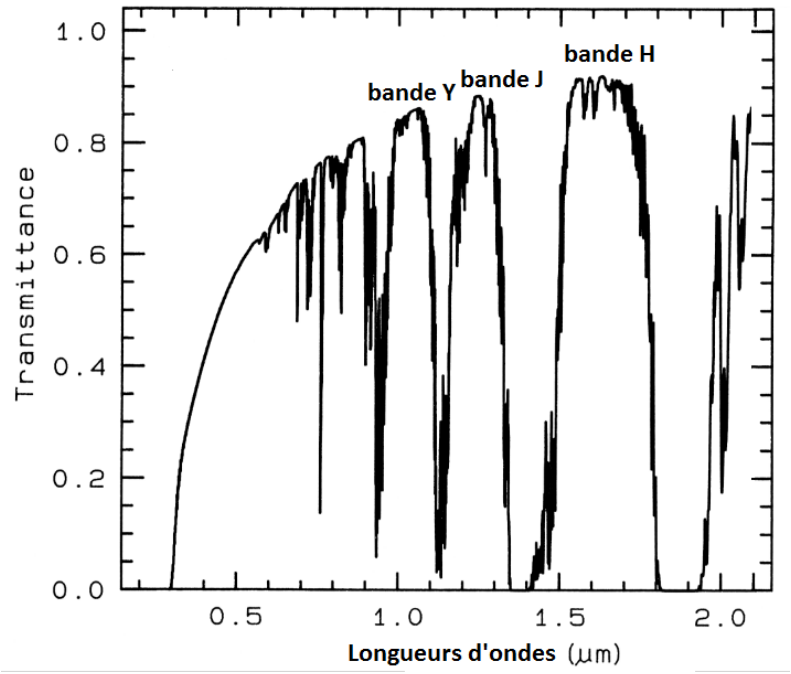


Figure IV.2 : Modélisation de transmission atmosphérique, en visible et proche infrarouge et SWIR. La plupart des absorptions sont dus à l'eau (Clark 1999).

Il convient de noter que tous les détecteurs infrarouges utilisés par les télescopes nécessitent un refroidissement important pour minimiser le bruit de courant d'obscurité d'origine thermique qui submerge le signal photonique désiré. Les détecteurs NIR/SWIR utilisent généralement le tellurure de mercure-cadmium comme capteur photo-électrique (HgCdTe : mercatel), qui doit être refroidi à -190 degrés Celsius. Les capteurs basés sur l'arséniure d'indium-gallium (InGaAs) sont une alternative beaucoup moins coûteuse (10-20x moins cher, 17 000 € pour la caméra utilisée ici), et ils ne doivent être refroidis qu'à -30 à -60 degrés Celsius. Actuellement, l'utilisation de ces capteurs connait une croissance. Ces dernières technologies ont permis aux télescopes modestes d'être équipés avec des caméras IR, surtout les caméras dédiées aux observations en proche infrarouge, en effet, les dernières versions de ces caméras ont des bruits suffisamment faibles et ils permettent des observations à travers l'atmosphère dans des sites de bonne qualité. Ces capteurs ont commencé à trouver des nouvelles applications en observations astronomiques basées au sol, surtout en ce qui concerne les phénomènes associés aux planètes, lunes et petits corps dans le système solaire (activités volcaniques, tempêtes en saturne, flashs d'impacts, étude de l'atmosphère…).

I.2 Observation

Le choix d'une caméra IR réponds à quelques critères de sélection que nous résumons ici: la gamme de température correspondant au phénomène observé et la bande spectrale correspondante, la cadence d'acquisition (nombre d'images par seconde, puisque l'on cherche toujours à observer un phénomène transitoire), la résolution spatial et le champ de vision. Dans le proche infrarouge et l'infrarouge court, le InGaAs est l'un des matériaux de détection largement utilisés dans les capteurs en raison de son faible courant d'obscurité, même à température ambiante. La réponse spectrale des diodes InGaAs se trouve dans la gamme des longueurs d'ondes 0,9-1,7 µm, ce qui permet de mesurer le rayonnement de corps noir d'une source portée à une température entre 1770 et 3100 Kelvin. Ces températures correspondent aux températures rencontrées pour les phases vapeurs et liquides de matériaux silicatés. Ces capteurs sont donc, pour ce qui est du domaine de longueur d'onde, adaptés à l'observation des flashs.

Figure IV.3 : Caméra XEVA-1.7-320 utilisée dans les observations infrarouges.

Bande spectral	0.9 à 1.7 µm
Nombre de pixels (taille)	320×256 (30 µm)
Cadence	60 à 100 Hz
Control camera	USB2.0
Cadence d'acquisition maximale	100 images par seconde
ADC	12 bits ou 14 bits
Niveau de bruit	6 AD (low gain) 15 AD (high gain)
Refroidissement	Refroidissement par convection
Température ambiante	0° à 50° C
Dimensions	90 x 110 x 110
Poids	1.8 kg

Tableau IV.1 : Caractéristiques de la caméra XEVA-1.7-320 utilisée dans les observations infrarouges.

Les observations infrarouges s'effectuent depuis nos observatoires en utilisant la caméra rapide XEVA-1.7 basée sur un détecteur InGaAs (voir figure IV.3); financée par INSU-

France « Institut national des sciences de l'Univers »et mise à disposition de l'Université Cadi Ayad, dans le cadre de notre collaboration Franco-Marocaine. Cette caméra rapide de grande sensibilité dispose d'un capteur plus large "9,6*7,6 mm" par rapport à la Watec 902H2 "6,4*4,8 mm". La grande taille de ce capteur est due principalement à la grande taille de chaque pixel qui est de l'ordre 30 micromètres (8,3 microns pour la Watec). Les caractéristiques de cette caméra sont données dans le tableau III.1.

Les premiers tests de cette caméra ont été menés à l'observatoire AGM à Marrakech, et dans une deuxième étape nous avons installé un télescope C14 à l'Oukaimden dédié spécialement aux observations des flashs en Infrarouge (voir figure IV.4). Nous avons adapté la caméra IR XEVA-1.7 et le télescope à une monture AP900 qui fait un suivi adapté au mouvement lunaire. Le télescope et la caméra sont guidés depuis une salle de contrôle en utilisant l'ordinateur qui est également utilisé pour le stockage et l'analyse des données.

Figure IV.4 : Télescope C14 et Caméra XEVA-utilisée dans les observations infrarouges.

La caméra est pilotée via son logiciel X-contrôle, dont l'interface est présentée dans la figure IV.5, depuis cette interface l'utilisateur peut définir les paramètres d'acquisition : température de refroidissement du capteur, vitesse d'acquisition, le gain, faire les prétraitements et les étalonnages nécessaires avant l'enregistrement de données, et bien sûr enregistrer les données sous forme d'images où vidéos. Nous avons choisi de faire des acquisitions avec la cadence la plus grande possible en mode gain élevée, ceci coïncide avec une vitesse de 50 images brutes par seconde (50 fps), ce qui est cohérent avec la vitesse d'acquisition en visible de la camera Watec 902H2, qui vaut 25 images brutes par seconde en

mode entrelacé, et qui atteint 50 demi-images par seconde après dés-entrelacement d'images. En cas de réussite d'une première observation simultanée dans le visible et l'IR, ceci va nous permet de faire des comparaisons simplifiées entre les durées mesurées par chaque caméra ainsi que des caractérisations précises sur les évolutions des rayonnements au cours du temps dans chaque gamme spectrale.

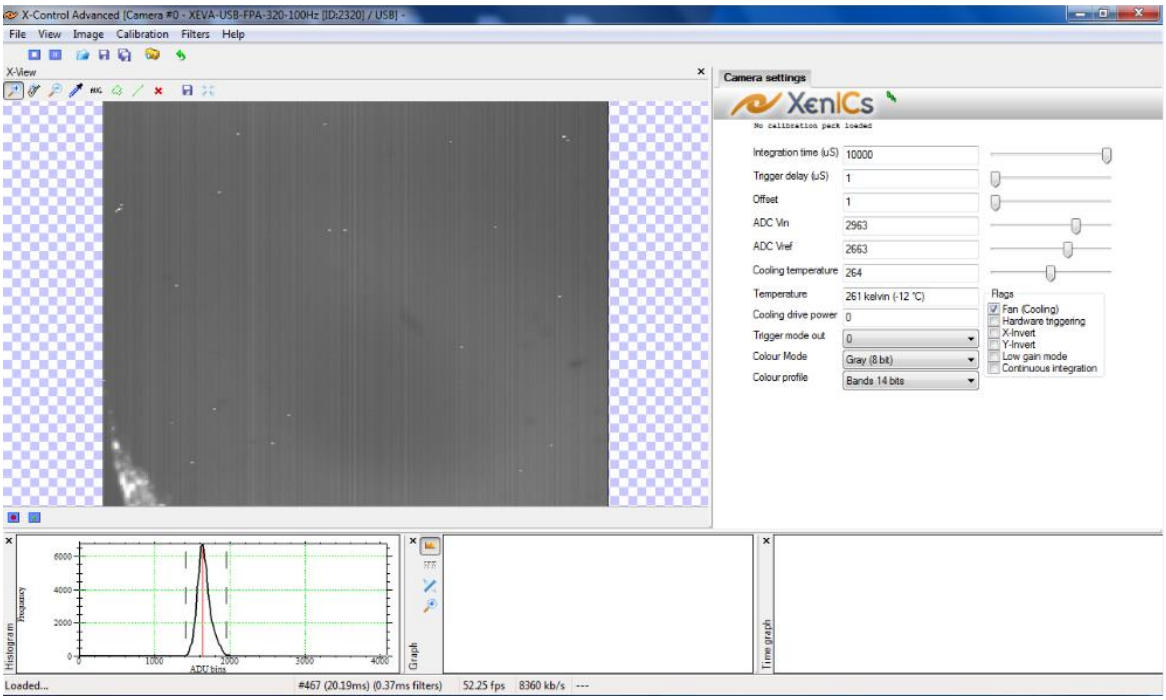


Figure IV.5 : Interface de logiciel de contrôle de la Caméra utilisée dans les observations infrarouges.

Figure IV.6 : La partie sombre du disque lunaire sur un champ de vision de 17*14arcmin, acquise par le C14. Le limbe est faiblement visible dans à gauche de l'image (contraste modifiée).

II. Résultats et discussion

La figure IV.6 montre une image vidéo de la portion sombre du disque lunaire prise par la caméra infrarouge XEVA-1.7 en mode gain obtenue avec le télescope C14 au début des tests que nous avons effectué à l'observatoire AGM de Marrakech. Le limbe lunaire et une partie de la surface lunaire sont visibles à gauche sur l'image, le rayonnement du reste de disque lunaire est bloquée par la présence atmosphérique, qui semble être non homogène, donc il ne s'agit pas d'émissions thermiques intrinsèques du ciel nocturne, qui sont plutôt homogènes dans l'atmosphère, mais probablement un effet lié aux aérosols, aux variations des vapeurs d'eau dans l'atmosphère, ou tout simplement à l'optique utilisée. Il est à préciser que les conditions météorologiques pendant la nuit où cette image à été prise ont été très favorables et les observations ont été effectuées sous ciel bleu et très clair. C'est rare que l'on arrive à faire apparaitre le limbe lunaire, même à des nuits apparemment favorables aux observations.

Les émissions thermiques de la portion sombre lunaire sont supposées faibles dans la gamme spectrale dont laquelle nous observons avec notre caméra, ainsi que les émissions dans le visible (lumière cendrée), puisque l'objectif principal est d'observer dans ces longueurs d'onde. En conséquence, la localisation du flash ne pourra pas se faire à partir des objets visibles à la surface de la Lune. L'imagerie en infra-rouge ne montre en effet aucun détail dans la partie non éclairée directement par le soleil du disque lunaire. La localisation du flash devrait donc toujours être faite conjointement à l'observation infrarouge par une observation dans le visible ; l'objectif des observations en infrarouge étant le suivi de l'évolution temporelle du flash, et l'expansion du plume, et de son refroidissement.

Un inconvénient reste quand même gênant dans la pratique : il n'est pas possible de distinguer entre le disque lunaire et le ciel (limbe lunaire), ce qui représente une difficulté au niveau du suivi du disque lunaire ainsi que pour garder un bon champ de vision dans les images. Les observations dans l'infrarouge nécessitent donc d'avoir une excellente mise en station, et une très faible dérive lors de l'observation.

La conception des capteurs infrarouges avec un grand nombre de pixels est difficile à réaliser, en particulier avec un courant d'obscurité faible. Le nombre de pixels déployé sur le capteur de la caméra XEVA-1.7-320 est faible en comparaison des caméras dans le visible : 320*256 pixels. Ce problème affecte en premier ordre la résolution spatiale, qui devient insuffisante si le but est de surveiller un grand champ de vision avec cette caméra. Cela signifie que même si le rapport signal/fond lunaire est plus avantageux que dans le visible, cet

avantage doit être modéré par le fait que le signal du flash peut-être noyé dans une plus grande surface émettant des radiations dans le proche infrarouge (diminution du rapport entre la surface apparente du flash et l'aire de la surface lunaire observée dans un pixel).

Nous avons cependant pour l'instant choisi de surveiller 70% de champ que nous observons dans le visible, afin de retrouver une résolution comparable à l'observation dans le visible et de tester les différents avantages à observer dans l'infrarouge. Le champ de vision capturé avec notre caméra est de l'ordre de 14×11 arc minute (voir figure IV.7) ce qui correspond approximativement à $2.8*10^6$ km^2 de surface lunaire surveillée avec résolution spatiale de plus que 8 km/pixel sur la Lune. Cette résolution reste légèrement inférieure à la résolution dans le visible – il s'agit d'un compromis qui permet de couvrir une surface importante de la Lune pour que la probabilité de détecter un flash ne soit pas trop faible.

La surface surveillée obtenue est considérablement petite, ce qui réduit la probabilité de détection des flashs, mais on ne peut pas surveiller plus de surface si on veut garder la résolution spatiale requise pour la détectabilité des flashs d'impacts ordinaires. La fonction d'étalement d'intensité lumineuse (PSF : Point spread function) doit être considérée, une PSF large partitionne le signale du flash (presque comme source ponctuelle) sur plusieurs pixels. À une longueur d'onde de 1 µm, le diamètre de la tache centrale d'Airy PSF de notre optique (~F/6) est de l'ordre de 15 à 20 µm, ceci est plus petit que la taille d'un pixel, mais serait en général suffisant pour distribuer le signal sur 2 où 3 pixels. Une petite délocalisation est aussi utile dans ce cas, en permettant aux sources lumineuses d'être étalées sur plusieurs pixels, ce qui favorise l'identification d'un flash à l'œil nu ou par utilisation d'un algorithme spatiale comme celui utilisé par LunarScan. En délocalisant un petit peu le système, nous avons capturé des signaux provenant de certaines étoiles de magnitudes relativement faibles « 7 à 9 ». Ce qui nous a confortés notre choix concernant la configuration utilisée.

Comme déjà dit, les radiations émises du coté sombre de la Lune dans la gamme spectrale surveillée sont faibles. La visibilité du limbe lunaire où une partie de la lumière cendrée dans les images aide à faire le suivi et garder le disque lunaire dans le champ de vision durant l'acquisition. Puisqu'on arrive rarement à distinguer le limbe lunaire dans la portion sombre et par la suite la limite entre le disque lunaire et le ciel, nous essayons d'être le plus proche possible de la partie éclairée et faire apparaitre légèrement l'une des cornes du croisant lunaire. Et nous faisons de même pour le Visible pour surveiller des régions similaires sur la surface lunaire. La figure IV.8 montre un exemple de champ de vison capturé avec la caméra IR, où l'un des cornes du croissant lunaire est visible en haut à droite de l'image. Ceci augmente bien sûr la quantité de lumière diffusée à partir de la partie éclairée de

la lune sur nos images, mais reste la seule solution possible actuellement, en attendant d'utiliser une deuxième caméra de guidage sur le chercheur de télescope pour assurer le suivi du disque lunaire en restant le plus loin possible de la partie diurne lunaire.

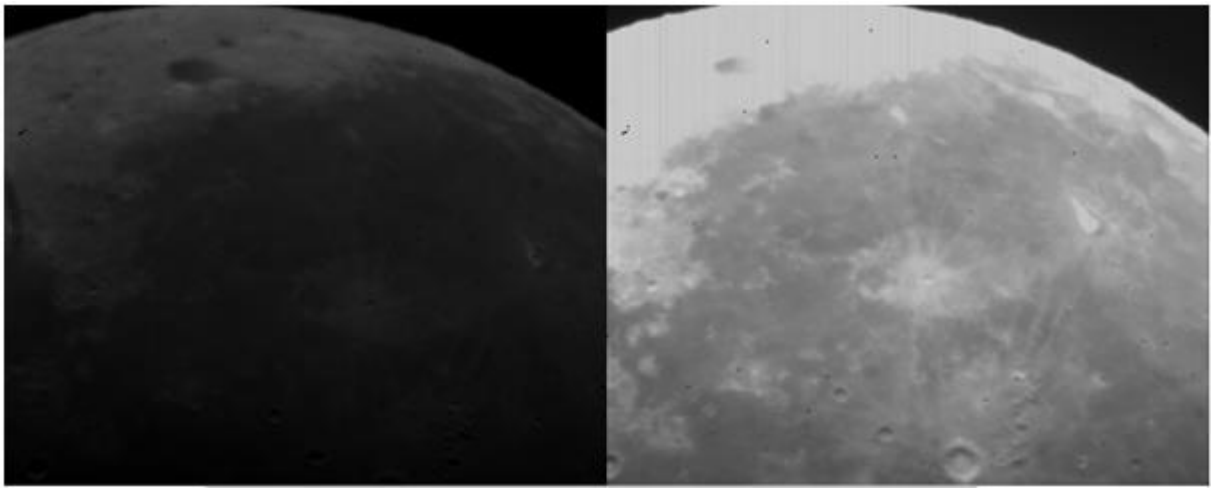


Figure IV.7 : Champ de vision correspond à la partie éclairé du disque lunaire capturé par caméra infrarouge, en mode gain 'Faible' (À gauche) et en mode gain 'Elevé' (À droite), installée sur un télescope C14 équipé d'un réducteur de focale 0.63x (nous surveillons l'équivalent de cette surface sur la partie sombre).

Figure IV.8 : Vu la difficulté d'identifier le limbe lunaire vers le côté sombre de la lune, et pour être en mesure de vérifier que le télescope est toujours sur le bon champ de vision, nous avons été obligés d'être le plus proche possible de la partie éclairée et faire apparaitre une petite partie du croissant lunaire ; comme on le voit à en haut à droite.

La taille des images enregistrées par la caméra est 320*256 pixels, ce facteur peut défavoriser une analyse optimale avec le logiciel LunarScan. Normalement LunarScan est

conçu pour s'appliquer sur des vidéos de taille 640*480 pixels ou plus (ceci lié à l'algorithme utilisé par le logiciel). À ce stade, nous ne sommes pas sûrs que les résultats d'analyse automatique des données avec LunarScan seront indépendants de la taille des images analysées. Donc pour l'instant, et surtout pour confirmer une première découverte, nous utiliserons la détection en visible comme référence temporelle. Après la détection d'un flash avec LunarScan en visible et la détermination précise de l'instant d'impact, nous extrairons ensuite la partie d'enregistrement infrarouge susceptible de contenir l'événement, et nous ferons une recherche approximative sur les images correspondant au moment de la détection en visible afin d'identifier le flash automatiquement, sinon à l'œil nu. C'est pour cela qu'une synchronisation temporelle entre les deux télescopes doit être respectée au maximum durant l'acquisition des données conjointes Visibles et IR.

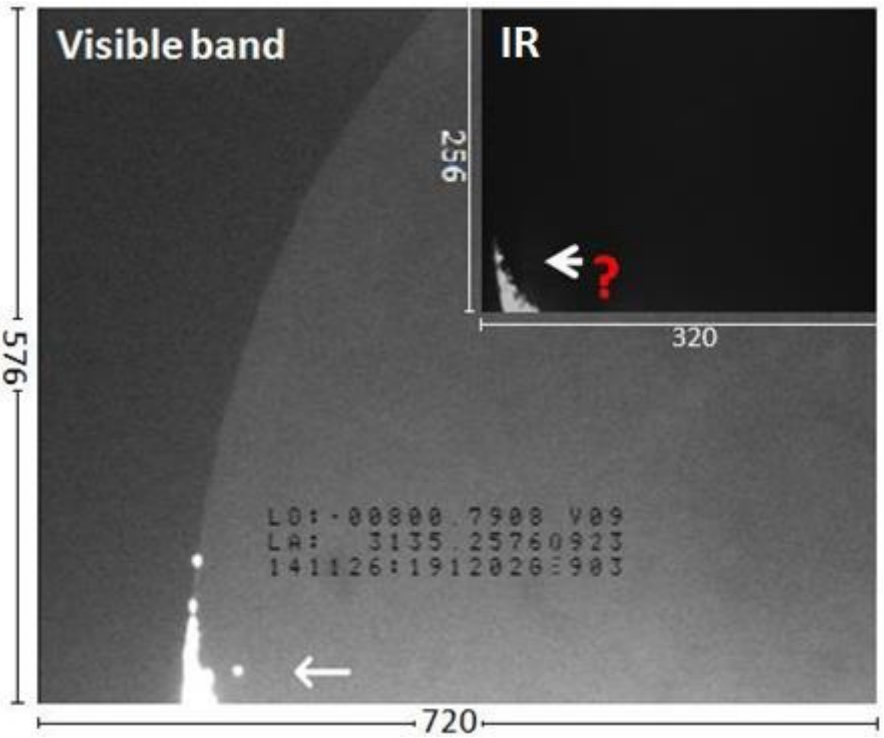


Figure IV.8 : Les images en visible et infrarouge à l'instant de la détection du 3ème Flash. L'échelle des résolutions est réelle, notez la différence entre les tailles des images dans les deux bande.

Depuis Novembre 2014 jusqu'à Juin 2016, nous avons réalisé plus de 40 heures d'observation en visible et IR simultanément dans des conditions d'observations parfaites (voir calendrier d'observation en Annexe A). Le 26 novembre 2014, notre 3ème flash a été observé en visible et il a été identifié automatiquement avec LunarScan, cette nuit l'acquisition été simultanée en visible et en IR, en utilisant le Meade LX200 pour la Watec 902H2 et le C14 pour la caméra XEVA. Le troisième flash est le plus brillant des flashs que nous ayons observé avec une durée de 120 ms (derrière le premier ayant 160 ms), et sa présence en bande IR nous apparaissait fortement probable. Nous avions pensé que nous

trouverions facilement le flash dans la bande IR après extraction des images qui correspondent à l'instant de détection du flash en visible. Après la localisation temporelle du flash sur les images visibles, nous avons cherché automatiquement et après manuellement le flash dans la séquence infrarouge. La recherche été infructueuse, et aucun flash n'a été identifié dans l'enregistrement IR. Nous avons supposé que le problème pourrait simplement dû à la synchronisation temporelle entre les enregistrements dans les deux caméras. En effet, des contraintes techniques nous obligent parfois à arrêter l'enregistrement et le relancer tout de suite dans l'un des télescopes. Malheureusement, c'était le cas durant l'instant de détection de ce troisième flash. Les images prises par la caméra IR ne sont pas horodatées par un système GPS comme c'est le cas dans le visible, et il n'y a pas moyen d'utiliser le temps indiqué par l'ordinateur pour localiser temporellement les événements, ceci est bien sur après synchronisation entre les deux ordinateurs. En procédant ceci avec ces précisions, l'erreur qui peut être engendrée est normalement de l'ordre d'une dizaine de millisecondes à une seconde au maximum. Après la recherche de la partie vidéo IR qui correspond à l'instant de détection indiqué dans les images en Visible, nous avons constaté que l'instant de détection indiqué en Visible a coïncidé avec les premiers moments (la première minute) du lancement de l'enregistrement infrarouge. Donc si la synchronisation était bien réglée, et si le flash existe en IR, il devrait être présent dans les premieres 3000 images capturés. Malheureusement, ce n'était pas le cas et l'absence du flash dans l'enregistrement infrarouge peut être simplement liée au fait que l'instant où il a survenu a coïncidé avec le laps de temps dans lequel nous avons relancé l'acquisition en infrarouge.

N'oublions pas que l'influence atmosphérique due à la diffusion par les aérosols, la turbulence ou humidité dans l'atmosphère sur le site peut être la cause principale de l'absence de ce flash dans les images infrarouges. Pour cela, nous avons décidé de mener les observations infrarouges depuis l'observatoire de l'Oukaimden, en gardant les observations en Visible depuis AGM.

D'autres causes fortement possibles peuvent être liées àla résolution spatiale de la configuration instrumentale. Il est à rappeler que le 3ème flash a été détecté pendant la première phase des tests à AGM, à cette période la configuration instrumentale utilisée n'était pas optimisée à 100%, car à AGM nous disposons d'un seul télescope C14 l'autre était un Meade LX200, alors que la configuration optimale nécessite 'utilisation deux C14 pour que le partage des réducteurs de focales et les adaptateurs entre les deux télescopes soient cohérent avec les optimisations les plus favorables.

Le 4ème et le 5ème flash que nous avons observé par la suite avaient des durées relativement courtes ainsi que des intensités lumineuses ordinaires, et nous n'avons pas réussi leur identification en infrarouge, ce qui confirme l'influence des perturbations atmosphériques sur le type d'observation.

Des difficultés similaires ont été rencontrées par les astronomes de NASA MFSC qui font aussi des observations simultanées (Visible et IR) en utilisant un seul télescope et un beamsplitter, cela a été souligné par ce groupe dans le Workshop organisé en Juin 2015 au centre ESTEC de l'ESA au quel j'ai participé noter (voir le rapport de ce meeting en Annexe B). Les collègues américains rapportent aussi un problème de «persistance» dans le signal de la caméra IR utilisé «lors du déplacement d'une source lumineuse sur le capteur, qui laisse une trace derrière ». Cela ne devrait pas changer la magnitude du flash, mais aura un effet sur la courbe de lumière (Rob Suggs NASA-MFSC ; communication personnelle). Ceci est considéré comme étant lié à la lecture en sortie et non pas au capteur lui-même. Dans notre cas, nous n'avons pas rencontré ce genre de problème technique.

III. Conclusion

D'un site d'observation à l'autre, la qualité du ciel diffère, et les différents paramètres qui peuvent être plus ou moins nuisibles sont liés aux émissions des molécules dans l'atmosphère, la luminosité du ciel nocturne, ainsi que la variabilité dans la vapeur d'eau. Les limitations systématiques devant l'observation depuis le sol dans la gamme de longueurs d'ondes 0.9-1.7 µm est encore incertaine. Les capteurs InGaAs n'ont été utilisés que récemment dans les observations astronomiques, et n'ait pas encore connu de succès considérables. Mais ces capteurs proches infrarouges restent prometteurs en raison de leur faible courant d'obscurité, et surtout après l'amélioration récente de la résolution des matrices CCD utilisées dans ce genre de caméras.

La grande taille angulaire de chaque pixel collecte des zones considérables dans les différentes couches atmosphériques qui absorbent et émettent aussi dans l'infrarouge, ce qui peut noyer fortement le signal. Les perturbations atmosphériques, la variation de la luminosité et de la qualité du ciel montrent souvent des différences significatives sur des échelles de temps de l'ordre de quelques secondes et de quelques minutes. La minimisation du champ de vision peut améliorer la résolution spatiale en minimisant ainsi l'intensité du bruit atmosphérique qui submerge le signal. Cependant la réduction du champ de vision réduit la surface lunaire surveillée ce qui diminue la probabilité de détection, et ceci doit être pris en compte pendant les optimisations. Puisque le fond lunaire reste non visible sur les images, l'usage d'un grand pixel n'a plus d'intérêt. La réduction de la taille des pixels va permettre de minimiser les perturbations atmosphériques collectées par chaque pixel, en augmentant ainsi le seuil de détectabilité d'un flash. Une résolution spatiale améliorée peut être atteinte si la taille des pixels est réduite, et en augmentant le nombre de pixels est amélioré. Des capteurs avec des matrices ayant des formats entre 640*512 et 720*576 sont grandement souhaitables.

Il est à noter que la caméra IR que nous utilisons actuellement a été achetée en 2011 et fabriquée en 2005, et elle était parmi les meilleurs choix à l'époque. Actuellement, et après le développement récent des capteurs infrarouges ces dernières années, il est possible de trouver des CCD infrarouges rapides avec des résolutions améliorées en gardant un courant d'obscurité faible. Notamment, une version récente de la camera XEVA utilisée dans ce travail est maintenant disponible avec une grille plus échantillonnée de 640*512 pixels et même qualité d'image (courant d'obscurité faible). L'utilisation d'un tel capteur augmentera d'avantage la résolution ainsi que la sensibilité. Nous souhaitons acheter cette caméra dans le cadre d'une future collaboration, vu les résultats prometteurs obtenus par la présente camera.

Références

Bouley S., Baratoux D., Vaubaillon J., Mocquet A., Le Feuvre M., Colas F., Benkhaldoun Z., Daassou A., Sabil M., and Lognonné P. 2012. Power and duration of impact flashes on the Moon: Implication for the cause of radiation. Icarus 218: 115-124.

Clark, R. Melosh, H. The detectability of lunar impacts in the near infrared.Master's thesis, The University of Arizona, Department of Planetary Sciences, 1996.

Clark, R. N., Chapter 1: Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy, in Manual of Remote Sensing, Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences, John Wiley and Sons, New York, p 3- 58, 1999.

Loubere, P. (2012) The Global Climate System. Nature Education Knowledge 3(10):24.

Conclusion générale et Perspective

La Lune a toujours été un objet d'étude privilégié pour les planétologues. Les chutes des météoroïdes à hyper-vitesses sur la Lune engendrent des séismes lunaires, créent des cratères d'impact, font fondre les roches, et génèrent des nuages de plasma et vapeurs avec des composés issus des éléments chimiques présents dans les roches lunaires qui contribuent temporairement à la fine atmosphère de la Lune. Ce phénomène produit également un flash lumineux très bref. Les différents effets physiques de ces collisions sont maintenant techniquement observables par les missions spatiales en orbite autour de la Lune ou par les atérisseurs lunaires (ex. : les missions Apollo pour les séismes, LROC pour les nouveaux cratères ou LADEE pour l'environnement et la fine atmosphère de la Lune). La détection des flashs lunaires est également possible depuis le sol. Le grand météore imprévu qui a eu lieu en Russie à Tcheliabinsk le 15 Février 2013, ainsi que d'autres grands évènements qui ont été rapporté dans les 100 dernières années ont clairement mis en évidence les risques associés à la chute de petits astéroïdes sur notre planète (10-50 m). Les missions d'observation télescopiques terrestres et spatiales actueles restent incapables à découvrir un nombre significatif d'astéroïdes dans la gamme de tailles < 100 m. Les techniques d'observations des bolides ont donné une première mesure du flux d'objets dans la gamme 10 à 50 m et ont permis de constater que le nombre de géo-croiseurs dans cette gamme est un à deux ordres de grandeur plus élevé que les anciennes estimations. Hors, les observations des bolides sont limitées à des zones de surveillance atmosphériques locales. La surveillance des flashs d'impacts lunaires semble une piste alternative et prometteuse pour quantifier le taux d'impact sur la Lune, et par extension le taux d'impact terrestre dans cette gamme de taille. Ces observations contribuent à la caractérisation du flux météoritique dans une gamme de tailles encore mal échantillonnée. La surface de la Lune observée depuis la Terre offre une grande surface collectrice qui peut être surveillée. Cela permet d'observer plusieurs évènements au cours de l'année jusqu'à des tailles sub-métriques. Cette technique permet aussi d'enregistrer des phénomènes exceptionnels comme le cas des deux grands flashs d'impacts observés par Suggs et al. (2014) et celui observé par Madiedo et al. (2014).

L'observation des flashs d'impact depuis le sol est également largement motivée par la sismologie lunaire : cette observation fournit le temps et la position du site d'impact, l'estimation de l'énergie d'impact, et, avec une hypothèse sur la vitesse, la taille de

l'impacteur. La taille des cratères d'impact produits peut être également estimée à partir des lois d'échelles de la cratérisation. Les impacts météoritiques représenteront une partie importante du catalogue d'événements sismiques qui seront utilisés dans les futures explorations pour contraindre la croûte et le manteau lunaire. Ces observations ouvrent la possibilité de fournir l'instant et la position de la source sismique de manière indépendante et précise au profit de futurs réseaux séismiques lunaires (ILN-NASA: 2018 / SELENE II-JAXA: 2017 / Lunette-NASA: 2018), ce qui va conduire à une réduction du nombre d'inconnues (facteur décisif pour une bonne inversion des sismogrammes). Une mesure indépendante des paramètres physiques des impacts (temps, position, énergie) est indispensable à ces futures missions sismologiques lunaires, en particulier si le nombre de stations déployées est faible (dans le cas d'une seule station, l'observation des flashs serait un élément incontournable d'une telle mission) Un impact artificiel provoqué (énergie connu) serait également très utile si les deux sont détectés sismiquement et optiquement. Cela permettra de mieux calibrer à la fois les mesures sismiques et photométriques, et d'évaluer certains paramètres physiques impliqués dans les calculs. Les détections conjointes 'optiques et sismiques' des impacts météoritiques vont notamment améliorer notre compréhension du partitionnement entre énergie mécanique et énergie thermique au moment de l'impact, et offrent une opportunité d'examiner la validité des lois d'échelles pour des impacts qu'il n'est pas possible de produire en laboratoire.

L'utilisation des caméras de haute résolution, 'ex : Lunar Reconnaissance Orbiter Camera', pour identifier les nouveaux cratères créés par les impacts observés depuis le sol est également intéressante. L'étude des flashs et leurs cratères associés pourrait améliorer les lois d'échelle utilisées dans l'analyse des impacts ce qui pourrait grandement accroître la compréhension des populations d'impacteurs et des cratères de petites tailles. L'identification des nouveaux cratères fournit également une mesure du taux d'impact actuel, qui pourrait être utilisée pour calibrer les fonctions de production basées sur le comptage de cratères applicables sur les terrains très jeunes où les petits cratères dominent. Ces approches complémentaires peuvent aussi contribuer au début sur la caractérisation du rôle des cratères primaires et des cratères secondaires dans la courbe de production de cratères d'impact, que nous utilisons dans la datation des surfaces planétaires. Un catalogue de nouveaux cratères peut être fourni par les observations des flashs avec une précision de séléno-localisation de moins de 5 km, une telle base de données va certainement faciliter la recherche d'un grand nombre de nouveaux cratères par les futures caméras (ou actuelles) en orbite autour de la Lune. Ces effets sont confirmés par la réussite de l'identification des deux cratères associés

aux grands flashs lunaires observés par l'équipe américaine Suggs et al. (2014) et espagnole Madiedo et al. (2014) respectivement le 17 Mars 2013 et 11 Septembre 2013.

Les 100 jours de mesure effectués par l'orbiteur lunaire LADEE « Lunar Atmosphere and Dust Environment Explore » entre Novembre 2013 et Janvier 2014 étaient suffisants pour identifier des changements de concentration de poussière et sodium lunaire et confirmer qu'ils sont corrélés aux impacts de météoroïdes. Ces études montrent que la caractérisation de l'atmosphère lunaire mince (composition, sources, distribution et variabilité…) ne peut être comprise sans considérer les interactions du flux météoritiques avec la surface lunaire. Dans ce sens, de futures missions semblables à LADEE pourraient travailler en collaboration plus étroite avec les réseaux de détection de flashs lunaires au sol.

L'observatoire de l'Oukaimeden se place à la suite de cette thèse comme leader Africain pour l'observation des impacts lunaires et pourra jouer un rôle important dans un futur réseau international des observatoires et souhaite participer à terme à la caractérisation du flux d'impacts actuel dans le système Terre-Lune, à la valorisation scientifique de données sismologiques lunaires et les autres futurs explorations lunaires.

L'élaboration d'un système opérationnel au niveau de notre observatoire pour mener des campagnes de surveillances régulières de la surface lunaire a été réalisée dans le cadre de cette thèse. Les télescopes utilisés au cours de ce travail ne sont pas dédiés seulement à l'observation des flashs. L'installation de l'expérience (télescopes, caméras,…) s'exécute lors de chaque nuit d'observation. La charge de travail nécessaire pour réaliser des observations régulières, enregistrer et analyser de grandes quantités de données ont été les principales limitations de notre capacité d'observation. En dépit de ces difficultés, nous avons réussi la détection et la confirmation de cinq flashs d'impacts dans les conditions optimales d'acquisition de données. Les résultats de notre programme de surveillance sont analysés avec une estimation des paramètres physiques associés à chacun des flashs. Les flashs observés sont tous à images multiples de durées comprises entre 40 et 160 ms. Les magnitudes visibles des impacts observés sont comprises entre 7.1 et 9.6. Les magnitudes et les durées de tous ces flashs montrent une cohérence avec la tendance magnitude-durée révélée dans Bouley et al. (2012). Les énergies cinétiques de ces impacts sont comprises entre 3×10^{7} J et 28.7×10^{7}J. Les projectiles impliqués dans ces collisions pourraient avoir des masses entre 150 g et 2.3 kg (si nous considérons 16,9 km/s comme vitesse d'impact). En utilisant une densité de projectile de 3200 kg/m^{3}, les diamètres de ces météoroïdes sont estimés entre 5 et 15 cm. Ces impacts auraient donc laissé des cratères sur la Lune ayant des diamètres entre 1,6 à 4,8 mètres.

Une première estimation du flux d'impact mené par cette phase de surveillance des impacts lunaires depuis nos observatoires a été présentée, et les résultats expérimentaux décrits dans la littérature ont été discutés et comparés aux nôtres. En considérant les 56 heures de surveillance effectuées sur une surface lunaire moyenne de 4,8 10^6 km^2 pour observer les quatre premiers flashs, nos estimations du taux d'impact actuel indiquent qu'environ 12 ± 4 cratères de diamètres supérieures à 1,5 m sont créés chaque jour sur notre lune. Une simple comparaison de ce taux de production expérimental préliminaire indique que le taux issu du comptage des cratères est 2 à 3 fois surestimé. Cette surestimation dans le cas des comptages des cratères sur les images des surfaces lunaires est peut-être liée aux cratères secondaires. En termes de flux d'impact terrestre, nous avons estimé qu'entre 15 000 et 30 000 météoroïdes de taille supérieure à 10 cm entrent en collision avec la Terre chaque année. Ce taux est cohérent avec les observations des bolides dans l'atmosphère terrestre. Or, le flux mené par observation des flashs lunaires depuis NASA-MFSC indique un taux annuel terrestre autour de 5 000 impacteurs, alors que le flux donné par le projet espagnol MIDAS (flashs lunaires) indique plus que 100 000 impacteurs. Le présent désaccord peut être simplement dû à la différence des approches adoptées pour calculer les énergies d'impacts dans chaque travail (valeurs différentes de l'efficacité lumineuse utilisée) – ce concept devra sans doute être révisé par la suite pour assurer une meilleure cohérence dans l'interprétation des différentes observations. De cette première étude, et après ajustement de nos résultats plus les flashs d'impacts observé par NASA-MFSC (Suggs et al. 2014) et le grand flash observé par Madiedo et al. (2014) avec les observations des bolides dans l'atmosphère terrestre (Silber et al. 2009 ; Brown et al. 2013), notre meilleure estimation du flux annuel cumulé de percuteurs de diamètres entre 10 cm et 20 m est donnée par la loi de puissance suivante : $N = 10,23 \times E^{-0.81}$. (N est le nombre d'impact avec une énergie supérieure où égale à E ; E dans l'intervalle 10^8-10^{16} Joules).

La qualité de nos détections nous a permis également de développer et tester une approche de localisation en préparation de futures missions sismologiques lunaires. L'approche est basée sur les caractéristiques de la surface visible dans la lumière cendrée sur nos images. Les coordonnées de ces caractéristiques peuvent être utilisées pour faire des transformations astrométriques et convertir les coordonnées (en pixels) d'un flash en termes de coordonnées sélénographiques lunaires. Une précision de séléno-localisation de moins 5 km a été atteinte. Pour une telle précision, l'incertitude de mesure du temps de propagation de l'onde sismique est réduite par un facteur de 6 par rapport à l'erreur engendrée par l'inversion temporelle des sismogrammes d'Apollo (sans localisation indépendante).

Nos premières tentatives ont été satisfaisantes, ceci nous a permis notamment de faire confiance à notre configuration instrumentale, ce qui confirme la maîtrise de l'observatoire de l'Oukaimeden de la technique expérimentale pour la surveillance des flashs lunaires. Ce travail pourra donc se poursuivre dans la durée.

Les objectifs principaux espérés à la suite de cette thèse sont :

- Une augmentation significative du nombre de flashs détectés, maintenant que la méthode d'observation est parfaitement maitrisée et surtout que deux télescopes semi-automatisés dédiés spécialement aux observations des flashs lunaires sont maintenant installés à l'Oukaimden. Ce nombre demeure encore très inférieure au nombre de détections réalisées de manière automatique par nos collègues américains de NASA-MSFC, et il existe un potentiel important de progression, même si nous n'atteindrons jamais les performances réalisées en automatique.

- L'amélioration de la configuration instrumentale, surtout celle utilisée en observation infrarouge, et l'élaboration d'un protocole optimale pour l'analyse des données infrarouges pour réussir les premières détections simultanées dans le visible et le proche infra-rouge.

- La détection des cratères d'impacts associés à nos flashs par l'analyse automatique d'images à haute résolution (20 cm/pixel) de la Lune (images avant et après le flash), en collaboration avec l'équipe américaine LROC (Lunar Reconnaissance Orbiter) et l'analyse de ces observations.

Les observatoires professionnels actuels de surveillances lunaires existent seulement en Amérique du Nord, en Espagne, et au Maroc. Ces observatoires n'ont accès qu'à une partie du temps d'observation depuis la Terre, et il est donc pertinent d'étendre le réseau d'observateurs aux longitudes de l'Afrique et de l'Europe, comme il serait pertinent de poursuivre une extension vers l'Asie et/ou le Moyen-Orient. D'autres observatoires sont en phase d'optimisation et validation de leurs configurions instrumentales, et nous attendons leurs premières détections des flashs, à savoir : Observatoire de DLR Berlin-Allemagne (Margonis et al. 2015, Luther et al. 2013), Observatoire de Athéna-Grèce: (Bonanos et al. 2015 & 2016), et l'Observatoire de l'université de Kent-Royaume-Uni (Avdellidou et al.2015). Nous appelons donc à la mise en réseau de ces moyens d'observation dans l'objectif de développer des programmes de suivi des flashs lunaires depuis plusieurs stations à travers le globe.

Il est prévu d'étendre à la suite de cette thèse les infrastructures d'observation des flashs lunaires en développant des collaborations internationales. Ce souhait se concrétise avec un accord de coopération récent avec l'Université King Abdulaziz d'Arabie saoudite. Dans le

cadre de cette coopération, un télescope a été installé fin 2014 à l'observatoire de l'Oukaimeden. Il est dédié à l'observation du croissant lunaire et l'étude de sa visibilité et son implication sur la précision du calendrier Hijri, le ramadan et les fêtes religieuses. Les collègues saoudiens prévoient de compléter l'installation d'un réseau international de 13 télescopes (dont 4 sont en Arabie saoudite), 100% automatisé à distance, et essentiellement dimensionné pour les observations lunaires avec le meilleur suivi possible. La possibilité d'utiliser ce réseau au profit d'observations des flashs lunaire existe, et en phase de négociation. Si l'accord est établi, Il faut tester les différents montages possibles pour répondre aux contraintes techniques pour l'observation des flashs lunaires. Cette opportunité pourrait nous permettre d'atteindre des taux de détection comparables à celles du Meteoroid Environnement Office de NASA-MSFC. Cela renforcera notre position pour poursuivre la construction d'un réseau international de télescopes dédiés à l'observation des flashs sur quelques heures d'observation par mois.

Au cours des dernières années, Il y a assez peu d'occasions où la phase lunaire était favorable pour réussir des observations pendant les périodes d'activités des essaims météoritiques majeurs (quand les essaims de météoroïdes rencontrent l'orbite du système Terre-lune). Parfois, quand la phase lunaire est adéquate, la géométrie de la rencontre n'était pas favorable, le radiant de l'essaim se trouvait dans l'hémisphère caché de la lune et la section efficace des impacts résultante est décourageante dans ces cas. Les années 2017, 2018 ainsi que 2019 sont prometteuses avec des rencontres géométriques plus favorables aux observations des flashs lunaires. Plusieurs essaims de météores seront actifs pendant des phases lunaires appropriées à l'observation des flashs et leurs paramètres orbitaux seront aussi favorables : ils permettront aux impacts de se produire dans la portion sombre du disque lunaire. Le tableau attaché en annexe C donne des exemples de trois essaims majeurs de météores que l'on pourra observer sur la Lune en 2017 et 2018. Les schémas des rencontres illustrant les zones lunaires qui seront foncièrement impactées pendant les pics de ces pluies météoritiques sont aussi présentées dans l'annexe C. Plusieurs heures d'observations seront prévues à ces occasions. Le tableau ne mentionne que les essaims qui seront à la fois observés en 2017 et 2018. Il y aura également d'autres rencontres favorables présentées dans les schémas : Taurides-S 2016 (5 Novembre), Quadrantides 2017 (3 Janvier), Ursides 2019 (23 Décembre).

LISTE DES ANNEXES

ANNEXES A : Page 173

Tableau récapitulatif des nuits d'observation effectuées en 2013 2014 2015 et 2016

ANNEXES B : Page 174

Rapport du Workshop « Lunar Impact Flash Workshop » ESA/ESTEC 2+3 Juin 2015

ANNEXES C : Page 176

Pluies des météores majeurs 100% favorables aux observations des flashes en 2017 et 2018 pendant les nuits des pics.

ANNEXE A

Tableau récapitulatif des nuits d'observation effectuées en 2013 2014 2015 et 2016 avec succès dans les meilleures conditions atmosphériques et techniques (les nuits à intervalles nuageux et les nuits des tests ne sont pas considérées).

Date	Interval	Durée
05/02/2013	03:30-06:30	3h00min
06/02/2013	04:30-06:30	2h00min
17/03/2013	20:15-22:10	1h55min
14/04/2013	19:55-21:25	1h30min
15/04/2013	20:10-22:12	2h10min
16/04/2013	20:15-23:15	3h00min
17/04/2013	20:00-23:55	3h55min
03/05/2013	03:45-05:15	1h30min
04/05/2013	04:30-06:00	1h30min
30/08/2013	02:45-03:30	0h45min
28/11/2013	03:30-05:00	1h30min
Total 2013		**22h45min**
25/01/2014	02:30-06:15	3h45min
26/01/2014	03:30-06:30	3h00min
03/02/2014	20:15-21:30	1h15min
04/02/2014	20:10-22:15	2h05min
05/02/2014	20:20-23:45	3h25min
23/05/2014	03:45-05:45	2h00min
31/07/2014	20:00-20:30	0h30min
01/08/2014	20:05-21:50	1h45min
16/11/2014	02:10-06:00	3h50min
17/11/2014	03:15-06:00	2h45min
18/11/2014	04:00-06:15	2h15min
26/11/2014	19:00-21:00	2h00min
25/12/2014	18:00-19:55	1h55min
26/12/2014	18:10-20:45	2h45min
Total 2014		**33h15min**
23/02/2015	19:25-21:15	1h50min
25/02/2015	19:30-23:15	3h45min
21/06/2015	21:00-21:45	0h45min
22/06/2015	20:50-22:05	1h15min
17/11/2015	19:00-21:00	2h00min
15/12/2015	18:40-20:10	1h30min
Total 2015		**11h05min**
04/01/2016	04:15-06:45	2h30min
01/02/2016	02:30-05:00	2h30min
02/02/2016	03:00-06:10	3h10min
13/03/2016		1h05min
31/03/2016		4h45min
01/04/2016		3h00min
02/04/2016		1h30min
11/04/2016		1h05min
12/04/2016		1h00min
12/05/2016		1h30min
09/06/2016		1h10min
10/06/2016		0h30
Total 2016		**23h45min**

ANNEXE B

Summary report of a Lunar impact flash workshop (LIWos) at ESA/ESTEC, 2+3 Jun 2015

Author: Detlef Koschny (European Space Agency)
A group of people working on the observation of impact flashes came together on 02+03 Jun 2015 at ESA/ESTEC in the Netherlands. Participants came from Univ. Kent UK, Univ. Hamburg, Germany; Univ. of Huelva, Spain; National Observatory Athens, Greece; DLR+TU Berlin, Germany, Obs. Marrakesh, Morocco, ESA, and NASA MSFC.

Each group presented their current setup and previous work and future plans. The presentations are available via the workshop webpage at http://cosmos.esa.int/web/lunar-impact-workshop.

Some results of the discussion:

1. Light flash length: The determination of the length of a flash was identified as an open issue.

2. Peak magnitude vs. integrated flux: A related open issue is the question of whether to use the peak magnitude or the integrated flux for the computation of the luminous efficiency.

3. The temperature of an impact flash is considered an open issue.

4. More work is needed to understand the population index in the size range we are looking at. The population index affects both the shower association and the luminous efficiency computation.

5. Framerate: It was concluded that a higher framerate than the typical video rates (50/60 Hz) would be beneficial. Even though this will result in lower exposure times, the number of detectable impact flashes may not decrease as the peak magnitude is reached only for a short period of time, most likely shorter than the exposure time. Shorter exposure times may actually result in higher detection efficiency as the peak signal is less contaminated by background light.

6. IR cameras: Some teams have used near-IR cameras in addition to visible light cameras. The following items were found important in this respect: (a) the exposures of the cameras should be synchronized. (b) Attenuation of the red part of the spectrum in refractive elements may be important. When designing new systems which are looking at spectral signatures, this should be taken into account. (b) Even when using a dichroic it is beneficial to add filters. (d) The switchover of the dichroic depends on its steepness. For a steep one, between the R- and I-filters is recommended; for a shallow one use V- and I. (e) Suggs reports 'persistence' in the signal of the IR camera they used, i.e. when moving a light source over the sensor it leaves a trail. This should not change the peak magnitude, but will have an effect on the light curve. It is assumed that this was a result of the read-out, not the sensor itself.

7. A good photometric calibration is important for determining the energy of the impact. In particular when using a setup with two cameras and dichroic it would allow us to get temperature information.

8. Flatfielding is considered important, in particular when using wide-angle systems where vignetting is an issue.

9. We discuss whether it would be useful to purposely defocus the system to allow to easier distinguish between cosmic rays and real impact flash events by checking the Point-Spread Function. This will, however, result in a decrease of detection probability due to fainter peak pixel values.

10. Georeferencing: (a) When georeferencing images, one can stack frames showing the Moon in earthshine to increase the contrast of lunar features. (b) A useful tool worth to be looked at is the Python library mpltoolkits.basemap. (c) ArcMAP GIS is a very useful tool which is often available in geology departments.

11. Fluxes: Some first work on deriving fluxes from the lunar impacts was shown. There seems to be a drop-off for objects with large masses relative to flux curves obtained by other means. It could be that emitted light in bright impact flashes doesn't make it out of the initial impact cloud, reducing the light visible from the outside. The total emitted light would be underestimated, thus underestimating the flux in the high mass ranges. This needs to be better analyzed. In addition, it is possible that there is a mass dependency in the luminous efficiency.

12. We discuss the possibility of having a common database to inject lunar impact flash observational data from various sources. NOA agrees to add in their database a field to note the data source, thus giving the possibility to allow access to other data providers.

13. More hypervelocity impact experiments are needed to determine the relation between luminous efficiency and projectile mass. Time evolution of the flash and ejecta speeds need to be measured more.

15. Straylight is an issue and needs to be carefully controlled.

16. We agree that if we see an impact flash we should inform our colleagues - without other people immediately exploiting this information.

17. Existing simulations on the light emission should be updated.

18. We agree to advertise that this workshop took place, in the spirit of getting more people including amateurs involved.

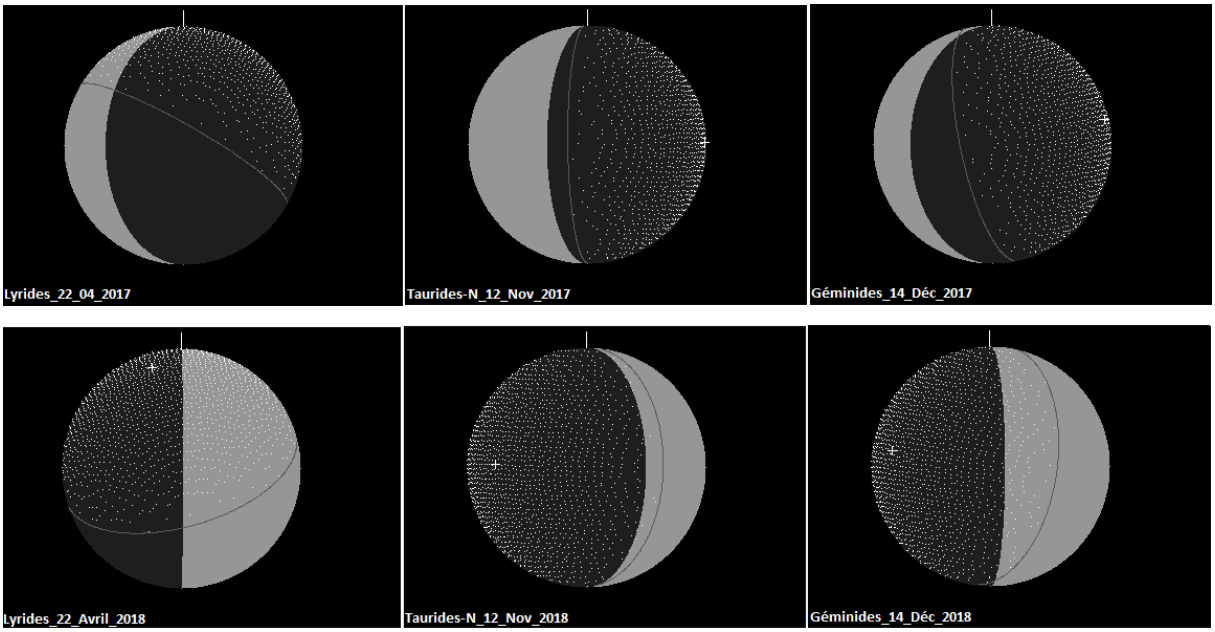
19. We will set up a Yahoo group for lunar impact flash observers using Yahoo.

20. The participants wish for clear skies.

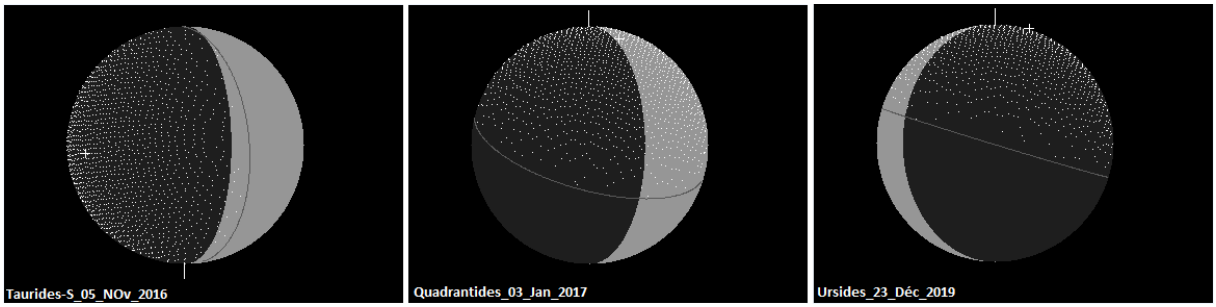
ANNEXE C

Pluies des météores majeurs 100% favorables aux observations des flashes en 2017 et 2018 pendant les nuits des pics.

Essaims météoritiques	Date de pics d'activité	Nombre d'heure prévu pour l'observation
Lyrides-N	22 Avril	3 H (2017) + 6 H (2018)
Taurides-N	12 Novembre	4 H (2017) + 4 H (2018)
Géminides	13 décembre	2 H (2017) + 5 H (2018)



Phases lunaires adéquates aux observations des flashs avec des géométries de rencontres favorables avec les Lyrides, les Taurides-nord et les Géminides à la fois en 2017 et 2018. La surface d'impact (délimitée par les points) admet le radiant lunaire (indiqué avec un signe +) comme centre. (Schémas procédées par le logiciel LunarSan (Gural 2007)).



Autres rencontres favorable aux observations des flashs :Taurides-Sud 2016, Quadrantides 2017, Ursides 2019.

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les impacts dans le système solaire

Figure I.1 : Les cartes topographiques de Mars. (A) L'hémisphère oriental centré à 20°N, 90°E; (B) l'hémisphère occidental centré à 20°N, 270°E; et (C) l'hémisphère nord centrée sur 90°N. ..... **Error! Bookmark not defined.**
Figure I.2: La topographie et la structure de la croûte de Mars. 14
Figure I.3 : Cratères d'impact sur un corps sans atmosphère comme la Lune. 16
Figure I.4 : Images de certains grands cratères dans le système solaire interne..... 16
Figure I.5 : Le taux d'impact par unité de temps dans le système Terre-Lune..... 18
Figure I.6 : Schémas obtenus avec la simulation numérique, représentant l'évolution du système planétaire à différentes époques 18
Figure I.7: Illustration des bassins lunaires sur la face cachée et la face visible lunaire 19
Figure I.8: Photo du flash lunaire de 1953 (Stuart 1956). L'image a été obtenue avec un télescope de 8 pouces en utilisant un film Kodak avec un temps d'exposition de 0,5 s..... 24
Figure I.9: Une mosaïque de Clementine créée à partir d'images UV/VIS (Buratti, 2003). Le site de l'impact observé par Stuart est au centre de la mosaïque et indiqué par la flèche 24
Figure I.10 : Les fragments de la comète Shoemaker-Levy 9 en image avec le télescope Hubble..... 26
Figure I.11 : Images prises par Hubble après le premier impact (fragment A), le jet de matière s'élève au-delà du disque de Jupiter..... 26
Figure I.12 : Séquence d'impact montrant le flash d'impact du Fragment W sur Jupiter, prise par le vaisseau spatial Galileo en route vers Jupiter à cette époque..... 26
Figure I.13 : Le flash d'impact du fragment H prise par le télescope de 1 mètre du pic du midi par l'astronome François colas. 27
Figure I.14 : Un flash d'impact observé durant le pic des léonides en 1999 (Ortiz et al, 2000) 28
Figure I.15 : Le grand météore imprévu et complètement inattendu qui a eu lieu en Russie le 15 Février 2013 30
Figure I.16 : Flash d'impact lunaire observé le 17 Mars 2013 à MEO-MSFC de la NASA (Suggs et al. 2014)..... 32
Figure I.17 : Panneau (a) Flash d'impact détecté de Séville par le 0,28 m télescope le 11 Septembre 2013 Madiedo et al, 2014 32
Figure I.18 : Histogramme cumulatif des événements de collision avec la Terre en fonction de l'énergie Suggs et al. 2014 36

Chapitre II : Généralités sur les flashs d'impacts lunaires

Figure II.1 : Etat de découverte des astéroïdes géocroiseurs jusqu'à 2015 49
Figure II.2 : Distribution d'une sélection de 91impacts de grands météoroïdes sur la face avant lunaire et la face cachée 53
Figure II.3 : Schéma (à l'échelle) de la structure intérieure de la Lune..... 54
Figure II.4 : (à gauche) Image prise par ''Apollo 15 Panoramic Camera'' en Août 1971 57
Figure II.5 : zoom d'images LROC avant-impact, zoom d'images LROC après-impact 57

Figure II.6 : Localisations des nouveaux cratères d'impact superposées au fond cartographique lunaire LRO-Wide-Angel-Camera..... 59
Figure II.7: ImageM183689789L NAC pré-impact de l'événement du 17 Mars..... 61
Figure II.8 : Les signatures d'un composant actif de poussière révélé par des images prises del'horizon lunaire après coucher de soleil par l'orbiteur lunaire Surveyor 7..... 63
Figure II.9 : l'orbiteur LADEE ''Masse: 383 kg; Dimensions: 2.37×1.85 m..... 63
Figure II.10 : De gauche à droite : 21%, 36% et 79% de surfaces d'impacts sont observables pendant l'activité des Quadrantides, Perséides et Taurides 2016 respectivement 66
Figure II.11 : Les phases favorables aux observations offrent 8 à 10 nuits par mois, est c'est entre le dernier et le premier quartier..... 67
Figure II.12 : Un champ avec une bonne qualité d'acquisition correspond à une observation au deuxième croissant..... 67
Figure II.13 : Spectre des différentes sources de rayonnement de la surface lunaire (lumière cendrée, émission thermique) par rapport à un rayonnement de corps noir à plusieurs températures..... 70
Figure II.14 : Comparaison entre le nombre cumulatif observé (carrés) et prévu (ligne) des impacts de Leonid en 1999 en fonction de l'énergie reçue sur Terre pour plusieurs efficacités lumineuses 74
Figure II.15 : Comparaison entre lefluxd'impact observé (carrés) et prévu (ligne pleine) des Taurides 2008, Géminides 2006, Lyrides 2007 75
Figure II.16 : Modèle de l'efficacité lumineuse en fonction de la vitesse d'impact ajustée aux valeurs déduites à partir des impacts expérimentaux et ceux observés sur la Lune..... 75

Chapitre III : Observation des flashs lunaires observés au Maroc

Figure III.1 : Carte des observatoires astronomiques universitaires/professionnels en Afrique 88
Figure III.2 : Vue de l'ensemble des télescopes installés à l'observatoire de l'Oukaimeden .. 89
Figure III.3 : Vue de l'extérieure de l'observatoire d'AGM, le télescope T600 à droite 89
Figure III.4 : Télescopes dédiés aux observations des flashs à AGM et OUCA 90
Figure III.5 : Caméra Watec 902H2 utilisée dans la capture des images vidéo..... 92
Figure III.6 : Différentes champs de visions possibles pour surveiller les flashs 94
Figure III.7 : Le système time-inserter TIM10, le système GPS pour horodater les images et le Vidéo Grabber USB 94
Figure III.8 : Le montage instrumental des équipements utilisés dans les observations 95
Figure III.9 : Les phases lunaires favorables aux observations des flashs d'impacts 96
Figure III.10 : Prise de vue de différentes fenêtres de LunarScan figurant pendant l'analyse 98
Figure III.11 : Différentes fausses détections principales 99
Figure III.12: Schématisations des critères préliminaires pour sélectionner les flashs candidats 100
Figure III.13 : Les deux premiers flashs détectés par LunarScan, avec des sous-images brutes pour chaque événement..... 104
Figure III.14 : La première image brute du flash F2 indique une première apparence du flash au moment d'acquisition du premier champ (impair) 106
Figure III.15 : La durée d'un flash à la base des images brutes peut être surestimée ou sous-estimée 107
Figure III.16 : Profils des répartitions d'intensités lumineuses correspondant aux pics des flashs 1 et 2 108

Figure III.17 : Principe de la photométrie d'ouverture 109
Figure III.18 : Exemple d'images vidéo de quelques étoiles utilisées pour calibrer les mesures photométriques du Flash détectés le 14 Avril 2013 110
Figure III.19 : Courbes de lumières des flashes observés le 6 Février et le 13 Février 2013 112
Figure III.20 : Flashs d'impacts observés par nos équipements et détectés automatiquement par LunarScan 116
Figure III.21 : Zoom avant sur les séquences d'images où les flashs ont été observés 116
Figure III.22 : Courbes de lumières des cinq flashes observés, représentées en termes d'énergie reçue sur terre en fonction du temps 117
Figure III.23 : Courbe Durée en fonction de magnitude avec les quatre premiers flashs détectés par les télescopes marocains apparaissant comme des étoiles rouges 117
Figure III.24 : *Gauche* L'énergie cinétique d'impact correspondant au flash F2 obtenue en convertissant l'énergie lumineuse visible par l'utilisation de différents d'efficacités lumineuses 121
Figure III.25 : La masse du météoroïde correspondant au flash F2 en fonction de la vitesse calculée pour différents efficacités lumineuses 121
Figure III.26 : Le nombre cumulatif annuel des impacts lunaires 126
Figure III.27 : Nombre cumulatif annuel des impacts sur Terre. 128
Figure III.28 : Les données présentées dans la figure III.27 ajustée par la loi de puissance proposée à l'issue de ce travail 132
Figure III.29 : *Gauche* Exemple d'une image vidéo . *Droit* Une superposition de 79 images 133
Figure III.30 : *Gauche* Profiles de répartition d'intensités lumineuses correspondant aux pics du flash 1 et 2. *Droit* Ajustements gaussiens utilisés pour la détermination des centroïdes des flashs 136
Figure III.31:(a) Image vidéo correspondant au maximum d'intensité du flash enregistré le 6 Février, 2013. Le flash est réparti sur plusieurs pixels. (b) La position du flash est donnée par un seul pixel illuminé est représenté sur les images vidéo empilés 137
Figure III.32 : (a) Image vidéo correspondant au maximum d'intensité du flash enregistré le 14 Avril, 2013. Le flash est réparti sur plusieurs pixels. (b) La position du flash est donnée par un seul pixel illuminé est représenté sur les images vidéo empilés 138
Figure III.33 : (a) Localisation du flash enregistré le 6 Février, 2013 sur une image de référence de la Lune. L'image a été déformée selon la géométrie de l'image de référence de la Lune. (b) Zoom avant sur la position possible du cratère d'impact associé au flash observé 139
Figure III.34 : (a) Localisation du flash enregistré le 14 Avril, 2013 sur une image de référence de la Lune. L'image a été déformée selon la géométrie de l'image de référence de la Lune. (b) Zoom avant sur la position possible du cratère d'impact associé au flash observé 140
Figure III.35 : Résolution spatiale moyenne sur la surface Lune donnée par la configuration instrumentale utilisée dans nos complaignes d'observations 141
Figure III.36 : Installation des observatoires des flashs lunaires dans plus d'une douzaine de pays 144
Figure III.37 : Installation des observatoires des flashs au Maroc et Arabie saoudite 144

Chapitre IV : Observation des flashs lunaires dans l'infrarouge

Figure IV.1 : Bandes spectrales infrarouges et fenêtres de transmission atmosphériques du rayonnement électromagnétique 152
Figure IV.2 : Modélisation de transmission atmosphérique, en visible et proche infrarouge et SWIR. La plupart des absorptions sont dus à l'eau 153
Figure IV.3 : Caméra XEVA-1.7-320 utilisée dans les observations infrarouges 154

Figure IV.4 : Télescope C14 et Caméra XEVA-utilisée dans les observations infrarouges..... 155
Figure IV.5 : Interface de logiciel de contrôle de la Caméra utilisée dans les observations infrarouges 156
Figure IV.7 : Champ de vision correspond à la partie éclairé du disque lunaire capturé par caméra infrarouge, en mode gain 'Faible' (À gauche) et en mode gain 'Elevé' (À droite)..... 159
Figure IV.8 : Difficulté d'identification le limbe lunaire vers le côté sombre de la lune 159
Figure IV.8 : Les images en visible et infrarouge à l'instant de la détection du 3ème Flash.. 160

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Coordonnées géographiques des stations d'observation des flashs lunaires au Maroc : Observatoire universitaire d'Oukaimden et Atlas Golf Marrakech..... 88
Tableau III.2 : Caractéristiques de la camera Watec 902H2 utilisée dans l'observation des flashs lunaires au Maroc..... 92
Tableau III.3 : Caractéristiques des équipements dédiés aux observations des flashs lunaire au Maroc 95
Tableau III. 4 : Les coordonnées des pixels correspondent aux centroïdes des flashs F1 et F2, pour chaque image où le flash est visible et sur l'image optimale..... 108
Tableau III. 5 : Les paramètres mesurés de tous les flashs observés 114
Tableau III. 6 : Les paramètres déduits de tous les flashs observés..... 119
Tableau III. 7 : Tailles des cratères correspondent aux flashs F1 et F2 calculée par la loi de Gault pour différentes densités de la cible et du projectile 122
Tableau III. 8 : Incertitudes de temps de propagation de ondes sismiques sur la base de 5 km d'incertitude 141
Tableau IV.1 : Caractéristiques de la caméra XEVA-1.7-320 utilisée dans les observations infrarouges 154