

Analyse détaillée des dépôts d'olivine : origine et implication

Nous avons vu dans la section 1.3, que la formation de la croûte martienne pourrait inclure la formation d'une croûte primitive à partir de la cristallisation d'un océan de magma et de son overturn (section 1.3.2), le resurfaçage de cette croûte par un volcanisme plus récent (section 1.3.3), et sa modification par des impacts ainsi que par des processus éoliens et d'altération aqueuse et/ou non aqueuse (section 1.3.4). Ces processus forment à la surface de Mars des assemblages de minéraux différents qui peuvent permettre de retracer leur évolution ainsi que l'histoire géologique, climatique, et interne de la planète.

Parmi les minéraux formés, l'olivine est l'un des plus intéressants pour étudier l'évolution volcanique et interne de Mars. En effet, dans un magma c'est le premier minéral à cristalliser et le dernier à entrer en fusion ($T^{\circ} > 1000^{\circ}\text{C}$). Sa présence dans les laves est donc souvent interprétée comme le signe d'un magma provenant directement du manteau sans avoir subi un fractionnement important au cours de son trajet vers la surface. La composition et l'abondance de l'olivine dans ces laves peuvent donc être directement reliées à la composition et aux conditions physiques (température, pression) du manteau martien. De plus, l'olivine est également un des premiers minéraux à s'altérer et sa présence, ou son absence, dans certaines régions martiennes peut témoigner de l'évolution des conditions présentes à la surface de Mars.

L'analyse globale de la distribution des détections d'olivine à la surface de Mars a été présentée dans la section précédente (section 3.5.4). Cette étude a permis de mettre en évidence des variations dans la signature spectrale à $1\ \mu\text{m}$ de l'olivine réparties sur 4 contextes géologiques majeurs : (1) les terrains du l'hémisphère sud, (2) les terrasses des bassins géants Argyre, Hellas et Isidis incluant la région de Nili Fossae, (3) les plaines du nord associées à des cratères ou à des affleurements, (4) la région de Valles Marineris. Ces quatre contextes géologiques suggèrent que l'olivine observée à la surface de Mars est le résultat d'origines diverses.

Ce chapitre sera consacré à l'étude détaillée des dépôts d'olivine associés à ces différents contextes géologiques. Cette étude commencera par une vérification manuelle et une augmentation de l'échantillon de détections fournies par la carte globale d'olivine OMEGA présentée dans la section 3. La méthode utilisée, qui sera décrite dans ce chapitre, permettra de mettre en évidence de l'olivine associée à des blocs rocheux particuliers autour du bassin d'Hellas, ce qui constituera un cinquième contexte géologique. Suivra une analyse locale et poussée de la morphologie, de la stratigraphie et des propriétés physiques des terrains dans lesquels l'olivine est observée et leur comparaison avec les propriétés des terrains adjacents pauvres en olivine. L'âge de ces terrains ainsi que leur appartenance à une unité géologique précise sera également étudié afin de les relier à d'autres structures géologiques et de les replacer dans l'histoire de Mars. En nous basant sur les résultats de ces études, nous proposerons un processus de formation à l'origine de ces dépôts d'olivine et nous discuterons de son implication sur l'évolution du manteau et de la croûte martienne. En raison de la complexité de sa détermination (section 3.5.4), la composition de l'olivine ne fera pas toujours l'objet d'une analyse particulière dans cette étude qui sera plutôt portée sur l'étude géologique des terrains. Cette composition sera néanmoins contrainte plus en détail pour certains dépôts d'olivine d'intérêt particulier.

Ces analyses vont demander l'utilisation d'un grand nombre de jeux de données différents qui seront mis en commun afin de pouvoir être comparés entre eux.

4.1 Méthode

Cette section est consacrée à la description de la méthode utilisée dans cette étude afin de (1) vérifier et augmenter l'échantillon de détection obtenu grâce à la méthode de détection automatique décrite dans le chapitre 3, (2) déterminer leur composition, (3) contraindre le contexte géologique précis et la morphologie de ces dépôts, (4) dater leur période de formation.

4.1.1 Vérification et augmentation de l'échantillon de détections d'olivine

La méthode de détection décrite dans le chapitre 3 a permis de mettre en évidence la répartition de l'olivine sur la planète de manière rapide et automatique cependant elle présente deux désavantages : (1) certaines détections peuvent être de fausses détections dues à des artefacts instrumentaux non répertoriés ou à la présence d'autres minéraux présentant une bande à $1\mu\text{m}$ comme le pyroxène ; (2) le seuil de détection à 1.04 a été choisi de manière très restrictive afin d'éviter la plupart de ces fausses détections, cependant cela peut avoir comme conséquence de ne pas détecter certains terrains enrichis en olivine dont la signature peut être affaiblie par la présence de poussière par exemple.

La vérification des détections se fera à partir d'une inspection manuelle des spectres OMEGA associés aux dépôts d'olivine observés sur la carte globale. Afin de mettre en évidence les signatures d'olivine on utilisera la méthode des rapports de spectre qui consiste à diviser le spectre étudié et contenant la signature d'olivine par un spectre obtenu dans un terrain adjacent de signatures spectrales proches, mais ne contenant à priori pas d'olivine (Figure 66). Cette méthode permet de supprimer les signatures spectrales des autres minéraux présents tels que le pyroxène ou la poussière et d'isoler la signature de l'olivine. Elle permet aussi de supprimer les artefacts et/ou effets de l'atmosphère résiduels. Pour un ratio convaincant, il est préférable d'avoir une valeur moyenne à 1 ce qui reflète un albédo et donc des propriétés spectrales très similaires, et un spectre plat après $1.7\mu\text{m}$ signe que les signatures des minéraux ont bien été enlevées. L'olivine étant très souvent associée au pyroxène, cela permet aussi de vérifier que le type de pyroxène (HCP/LCP) présent dans les deux spectres utilisés est bien le même, le contraire pouvant créer de fausses bandes à $1\mu\text{m}$ et $2\mu\text{m}$. À partir du rapport de spectre obtenu, on peut déterminer si la signature détectée est bien celle de l'olivine et avoir une indication sur le type d'olivine observé grâce à la forme de sa bande d'absorption (teneur en fer/taille de grain). Bien que ces rapports de spectres soient souvent nécessaires pour mettre en évidence les signatures d'olivine, notamment dans les régions avec des conditions surfaciques et atmosphériques difficiles telles que dans les plaines du nord, ils peuvent être affectés par des effets de pentes induits principalement par la présence de poussières. Cet effet est particulièrement important dans les plaines du nord pouvant conduire à de fausses détections, tel que l'a montré *Salvator et al.*, [2010]. Bien que nous nous appliquerons dans ces régions à baser notre identification sur les zones présentant le moins de poussière (albédo le plus faible) et à ne prendre en considération que les zones montrant des rapports de spectres répondant aux conditions énoncées précédemment (valeur moyenne à 1 et spectre plat après $1.7\mu\text{m}$), certaines signatures interprétées ici comme étant celles de l'olivine resteront à la limite de la détection et pourront être ambiguës. Quand cela est possible, il est donc cependant préférable de pouvoir détecter la présence d'olivine visuellement sans rapport de spectres grâce aux effets qu'elle a sur les signatures de pyroxène comme illustré sur la Figure 66 : décalage de l'aile droite de sa bande d'absorption à $1\mu\text{m}$ vers les grandes longueurs d'onde et diminution de la profondeur de sa bande à $2\mu\text{m}$.

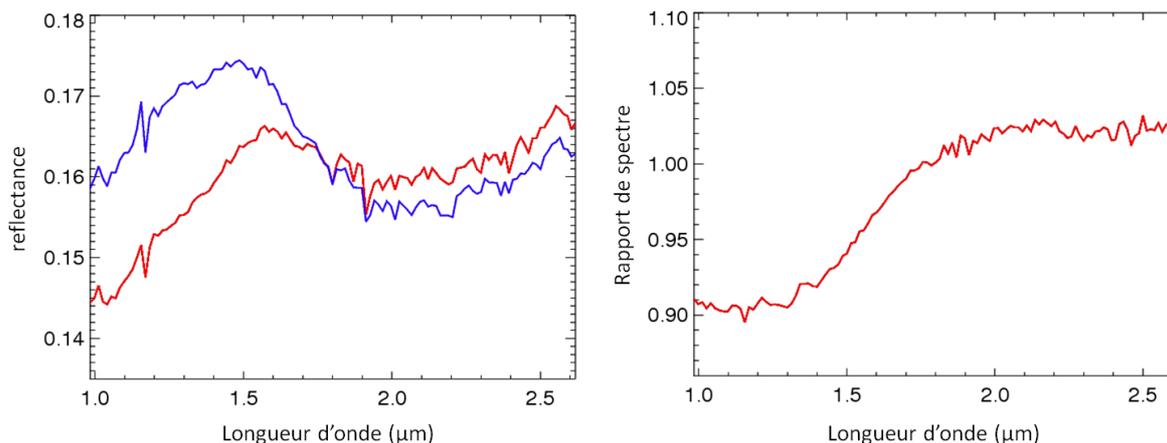


Figure 66. Illustration de la méthode des rapports de spectre. A) Spectres issus d'une région riche en pyroxène et pauvre en olivine (bleu) et d'une région enrichie en olivine, mais présentant également du pyroxène (rouge). B) Rapport de spectre entre les deux spectres présentés en A et laissant apparaître une bande claire d'olivine à 1 μm et un spectre plat après 1.7 μm .

Afin d'utiliser cette méthode de manière efficace et rapide nous utilisons un logiciel créé par John Carter durant sa thèse qui permet de visualiser instantanément les spectres ou rapports de spectre des pixels de l'observation étudiée. Le spectre utilisé en dénominateur dans le cas d'un rapport peut être également choisi au préalable dans l'observation. De cette façon, les signatures spectrales de la plupart des dépôts d'olivine détectés de manière automatique, et principalement ceux montrant des signatures très faibles et/ou composés de seulement quelques pixels positifs, ont été vérifiés.

Comme nous l'avons mentionné plus haut, les seuils des critères d'olivine ont été choisis dans le chapitre 3 afin d'éviter toute fausse détection lors d'une détection globale et systématique, ce qui a pour contrepartie la possibilité de ne pas détecter certaines zones enrichies en olivine. Dans le cas d'une analyse locale, le nombre d'observations utilisé est moindre et les spectres peuvent être vérifiés à la main selon la méthode décrite ci-dessus. Le seuil utilisé peut donc être ajusté manuellement afin de mettre en évidence la totalité du dépôt d'olivine. Le réajustement du seuil de détection a permis de redélimiter l'étendue spatiale de chaque dépôt d'olivine et également d'en détecter de nouveau. De plus, dans le cas où peu de données sont disponibles, il arrivera que des données affectées par des glaces ou des aérosols par exemple soient quand même utilisées, les détections étant au préalable vérifiées manuellement.

Dans cette étude, seul le critère OSP2 sera utilisé afin d'illustrer les dépôts d'olivine ainsi que les variations de signatures spectrales associées. En effet, celui-ci prend mieux en compte la forme de la bande d'absorption à 1 μm de l'olivine et notamment sa courbure entre 1.4 et 1.5 μm ce qui le rend moins sensible aux autres minéraux tels que les pyroxènes ou les oxydes ferriques. Baisser le seuil de ce critère est donc moins risqué que pour les deux autres critères. De plus, avec un seuil réajusté, ce critère peut détecter tous les types d'olivines, des signatures les plus faibles aux signatures les plus importantes qui ne peuvent pas être détectées avec OSP1 (voir section 3.3.3).

4.1.2 Composition

La composition de l'olivine en termes de teneur en fer et de taille de grain est très difficile à déterminer à partir de la valeur des critères spectraux et même à partir de l'inspection visuelle de la forme de la bande elle-même (section 3.5.4). Lorsque la détermination précise de

la composition sera jugée importante, nous utiliserons le modèle de transfert radiatif déjà présenté dans la section 2.3 [Poulet and Erard, 2004]. Dans le but de reproduire le spectre d'un mélange basaltique, ce modèle simule le mélange intime entre du pyroxène (HCP et LCP), du plagioclase et de l'olivine. Dans cette étude trois mélanges initiaux sont utilisés afin de séparer les effets de la taille des grains et de la teneur en fer : la première ne fait intervenir que de l'olivine type forsterite avec une taille de grain en paramètre libre, la deuxième est identique, mais pour une olivine de type fayalite, la troisième fait intervenir les deux types d'olivine, mais fixe la taille des grains à 100 μ m. Parmi ces trois conditions initiales, seule la modélisation avec le meilleur ajustement sera prise en compte.

4.1.3 Détermination du contexte et des propriétés physiques

Afin de mieux contraindre l'origine des dépôts d'olivine il est souvent nécessaire d'étudier leurs contextes géologiques, leurs morphologies et leurs stratigraphies à différentes échelles, ainsi que les propriétés physiques des terrains dans lesquels ils sont observés. Ceci se fera grâce à différents jeux de données dont les caractéristiques sont appropriées à l'étude de chacune de ces propriétés. Les principales caractéristiques de ces instruments sont également détaillées dans l'annexe 2.

Les propriétés physiques des terrains seront contraintes en grande partie grâce aux données infrarouges de l'imageur multispectral **THEMIS**, qui sont acquises avec une résolution de 100m/pixel de façon complémentaire de jour comme de nuit [Christensen et al., 2004c]. Ces données seront particulièrement utilisées pour différencier des surfaces formées de laves qui ont une grande inertie thermique, des surfaces sableuses ou formées de régolites. Elles permettent également d'identifier des affleurements de roches peu poussiéreux qui peuvent montrer des signatures d'olivines importantes. Dans certains cas, la carte d'inertie thermique **TES** pourra être utilisée afin de quantifier l'inertie thermique de la surface observée.

De par leur résolution spatiale plus faible que celle d'OMEGA, qui est de ~400m/pixels au minimum, les données THEMIS permettent également de fournir un contexte géologique relativement précis aux dépôts d'olivine observés. Les données THEMIS IR de jour montrent de plus un fort contraste entre les pentes éclairées par le soleil qui ont une température élevée et les pentes à l'ombre qui ont une température faible et sont donc très utiles pour étudier la topographie de la surface.

Certains dépôts d'olivine nécessiteront cependant une analyse à plus haute résolution spatiale que celle permise avec THEMIS. Dans ce cas, nous utiliserons principalement les données de la caméra **CTX** (Context Camera, Malin et al., 2007) à bord de MRO qui permet d'observer la surface à une résolution de 6m/pixels. Les observations CTX permettent de mettre en évidence la morphologie et la texture des terrains observés ainsi que leur relation stratigraphique avec les terrains adjacents, ce qui n'est pas toujours évident à déterminer avec THEMIS. Certains dépôts seront également étudiés grâce à la caméra à très haute résolution spatiale **HiRISE** (High Resolution Imaging Science Experiment, McEwen et al., 2007) qui a permis d'imager certaines régions très localisées de la surface de Mars à une résolution allant jusqu'à 25m/pixel. Cependant, du fait de leur très faible résolution spatiale par rapport aux données OMEGA, les variations en termes de textures ou de morphologies mises en évidence par ces données seront cependant difficiles à mettre en relation avec des variations dans les signatures spectrales d'OMEGA.

Pour finir, les données d'altimétrie **MOLA** seront également utilisées afin de contraindre l'altitude de certains dépôts.

4.1.4 Détermination de la période de formation

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer l'âge de formation d'une unité particulière. À l'échelle locale, et même à l'échelle globale pour les grosses structures, l'analyse stratigraphique peut permettre de contraindre une chronologie relative dans la formation des différentes unités qui composent la surface. Cette chronologie se base sur le principe de superposition qui postule qu'une unité est plus récente que celle qu'elle recouvre, mais plus ancienne que celle qui la recouvre. Cependant la chronologie obtenue reste relative et restreinte à l'unité elle-même et à la surface directement adjacente. Elle ne permet donc pas de replacer l'unité étudiée dans un contexte historique global. De plus, sa précision va dépendre de la qualité des images disponibles pour cette analyse ainsi que de la complexité des morphologies, certaines affectées par plusieurs milliards d'années d'érosion.

Une méthode plus précise consiste à utiliser la carte géologique produite par l'USGS à partir des données Viking [*Skinner et al., 2006*], qui a déjà été utilisée lors de l'analyse de la distribution globale de l'olivine dans la section 3.5.4 (annexe 2). Cette carte répertorie toute la surface de Mars selon plusieurs unités géologiques en se basant sur leurs morphologies (plaines, cratères, réseaux fluviaux, etc..) et leur appartenance à telle ou telle structure géologique importante (Tharsis, Elysium, hauts plateaux de l'hémisphère sud, bassin d'impact, etc..) et rattache ces unités à une des trois grandes périodes martiennes : Noachien, Hesperien et Amazonien grâce à un processus de comptage de cratère. Cette carte permet donc non seulement de replacer la formation des dépôts d'olivine dans l'histoire de Mars, mais également de les relier à une unité géologique dont les caractéristiques ont déjà été étudiées et répertoriées, ce qui nous facilitera l'interprétation de nos résultats.

Cependant, cette carte n'est parfois pas assez précise pour contraindre l'âge de certains dépôts de faibles étendues spatiales. En effet, les données Viking n'ont pas la résolution spatiale nécessaire pour différencier l'âge de certaines petites unités très localisées des grandes unités les contenant. Dans certains cas, quand la stratigraphie et la morphologie des dépôts étudiés montreront clairement qu'ils forment des unités distinctes d'âge différent que celles répertoriées par la carte USGS, nous redaterons ces dépôts grâce à une au comptage de cratères, mais en nous basant sur des données plus appropriées ou à plus hautes résolutions spatiales. Ainsi pour les dépôts d'étendue spatiale élevée, les données de THEMIS IR de jour seront utilisées. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, ces données permettent de mettre en valeur la topographie et sont donc bien appropriées au comptage et la détermination du diamètre des cratères nécessaires pour dater les terrains. Quand les dépôts à dater sont moins étendus spatialement, ce qui est souvent le cas dans cette étude, la datation se basera sur les données CTX ou les données de la caméra HRSC (High Resolution Stereo Camera, *Jauman et al., 2007*, annexe 2). Ces dernières seront cependant peu utilisées, les données CTX étant la plupart du temps disponibles et mieux adaptées. Afin de déterminer l'âge des terrains, nous avons procédé à des comptages de cratère sur certaines unités géologiques uniforme pour déterminer la distribution en taille des cratères présents. Cette étude a été réalisée par Damien Loizeau en utilisant le logiciel « *craterstats2* » développé par *Michael and Neukum [2010]*. L'âge des terrains est obtenu en ajustant la distribution de cratères observée par une fonction de production issue de *Ivanov [2001]*, et en utilisant la chronologie de *Hartmann et Neukum [2001]* pour traduire cette distribution de cratère en des âges absolus. Dans le cas où une déviation de la distribution en taille des cratères est observée pour les petits diamètres par rapport à la fonction de production en accord avec les grands diamètres, nous avons également testé les scénarios de resurfaçage (également avec « *craterstat2* »). Étant donné que nous nous intéressons ici à l'âge de formation du fond des cratères et plaines qui est fourni par la distribution en taille des plus gros cratères, cet âge de resurfaçage ne sera cependant pas pris en compte dans cette étude et

nous ne considérerons pas les plus petits cratères pour la détermination des âges (cratères de diamètres < 500m avec les images CTX et HRSC et <800m avec les images THEMIS).

4.1.5 Mise en commun des données

Afin de corréler les différentes informations, morphologiques comme minéralogiques, apportées par les données décrites précédemment, ces différentes images doivent être téléchargées puis assemblés et/ou superposées. Cet assemblage peut se faire en regroupant toute les données dans un Système d'Information Géographique appelé SIG (GIS en anglais). Un SIG est un logiciel permettant de gérer, d'analyser et d'éditer plusieurs types de données dans un même espace géographique défini par un système de coordonnées géographique et une projection. Dans ces logiciels, les différentes données sont alors considérées comme des couches reliées entre elles par leur appartenance au ce même espace géographique. Dans cette étude, les données seront comparées et analysées grâce aux outils puissants fournis par le logiciel GIS ArcGIS. Certaines analyses se feront cependant au préalable sous JMARS qui permet une visualisation rapide de toutes ces données (sauf les observations OMEGA) sans avoir besoin de les télécharger ou de les traiter (voir après).

Un récapitulatif des données utilisées dans cette étude indiquant la forme sous lesquelles elles sont utilisées sous ArcGIS (carte globale, observation individuelles), ainsi qu'un rappel de leur résolution spatiale et de leurs principales applications est donné dans le Tableau 6 .

Tableau 6. Récapitulatif des caractéristiques des données utilisées dans cette étude.

Données	Mission	Résolution spatiale (m/px)	Forme	Source	Application
OMEGA	Mars Express	300-4000	Observations individuelles	IAS	Minéralogie
Inertie thermique TES	MGS	3000	Carte globale	PIGWAD	Propriétés physiques de la surface
THEMIS IR nuit	Mars Odyssey	200	Cartes globale	PIGWAD	Propriétés physiques de la surface
THEMIS IR jour	Mars Odyssey	200	Cartes globale	PIGWAD	Propriétés physiques de la surface Morphologie Datation
CTX	MRO	6	Observation individuelles	PDS Geosciences Node	Morphologie Datation
HiRISE	MRO	0.25	Observations individuelles	PDS Geosciences Node	Morphologie
HRSC	Mars express	10	Observations individuelles	PDS Geosciences Node	Datation
MOLA	MGS	110-460	Carte globale	PIGWAD	Topographie
Carte géologique USGS	Viking		Carte globale	PIGWAD	Géologie Datation

Afin de pouvoir être affichées dans un logiciel SIG, ces données doivent être d'abord géoréférencées, i.e. associées à un système de coordonnées géographiques, puis projetées. Ces systèmes de coordonnées et projections doivent être identiques pour toutes les données si on veut pouvoir les comparer entre elles. Dans cette étude nous avons utilisé le système

géographique appelé Mars_2000_Sphère [Seidelmann *et al.*, 2002] et la projection « simple cylindrical » (ou "equirectangular" ou "equidistant cylindrical") qui permettent de représenter Mars selon un rectangle formé d'une grille d'intervalles constants : tous les méridiens sont verticaux et équidistants et tous les parallèles sont horizontaux et équidistants, les angles étant donc tous égaux à 90°. Le cylindre étant choisi tangent à l'équateur, cette projection n'entraînera que peu de déformations dans les régions équatoriales et aux moyennes latitudes où se trouvent la grande majorité des dépôts d'olivine.

Les cartes globales fournies par PIGWAD sont déjà géoréférencées et pourront donc être directement insérées sous ArcGIS.

Bien que les détections d'olivine OMEGA peuvent être corrélées aux autres données grâce à la carte globale déjà géoréférencée présentée dans le chapitre 3, il sera souvent plus efficace de n'utiliser qu'une seule observation OMEGA (ou deux si nécessaire) d'un dépôt donné afin d'en obtenir une image plus claire. En effet, celui-ci ne sera alors formé que de détections acquises selon les mêmes conditions photométriques et atmosphériques, ce qui n'est pas le cas dans les cartes globales, les variations dans les valeurs du critère d'olivine (OSP2) pourront donc être directement interprétées comme des variations de la signature spectrale. L'utilisation des données OMEGA va donc nécessiter que les observations utilisées soient géoréférencées et projetées une à une. Les cartes de critères d'olivine obtenues à partir de chaque observation utilisée sont facilement géoréférencées grâce au logiciel ENVI à partir des paramètres de latitudes et longitudes associées à chaque pixel de chaque observation OMEGA. Les cartes géoréférencées sont ensuite enregistrées au format GeoTIFF ce qui crée deux fichiers : un fichier .tiff contenant l'image avec la valeur du critère enregistrée pour chaque pixel et un fichier .tfw qui contient les informations géographiques de l'image.

Les données CTX sont fournies non géoréférencées et non projetées et nécessitent en plus des étapes de traitements supplémentaires telles qu'une calibration radiométrique et la suppression de bandes noires présentes sur les observations. L'ensemble de ces traitements peut être mené à bien grâce au logiciel ISIS qui regroupe tous les programmes nécessaires. En sortie les données sont fournies au format GéoTIFF comme les données OMEGA.

Les images HiRISE ne seront jamais utilisées sur ArcGIS, celles-ci ayant dans tout les cas des résolutions spatiales trop élevées pour être corrélées aux données OMEGA. Ces images seront donc étudiées directement sur JMARS où elles n'ont pas besoin d'être géoréférencées.

Après l'insertion des données sous ArcGIS, des décalages peuvent cependant subsister entre les images qui peuvent être gênants pour l'interprétation des données. Le logiciel ArcGIS permet alors de réaliser des points de calage afin de réajuster les images entre elles. Quand peu de données sont utilisées et que les contextes sont assez évidents, il est cependant souvent plus simple d'utiliser un logiciel de traitement d'image afin de réajuster ces images.

4.2 Etude détaillée des dépôts d'olivine

La méthode décrite dans la section précédente a été appliquée à tous les dépôts d'olivine détectés dans la section 3.5.4 (et ceux détectés après manuellement) afin de contraindre leurs contextes géologiques, morphologies, propriétés physiques et âges de formation particuliers. Ces contextes sont répertoriés sur la Figure 67 et seront détaillés dans les sections suivantes. Il est important de préciser ici que certains dépôts présentant des signatures d'olivine à la limite de détection ont quand même été répertoriés sur cette carte principalement en se basant sur la similarité de leur morphologie et de leurs propriétés physiques avec les dépôts montrant de fortes signatures d'olivine dans la même région. Dans les terrains du sud, les détections d'olivine sont principalement associées à des plaines et à des fonds de cratères plats hespériens (carrés roses et ronds rouges) ainsi qu'à quelques éjectas de cratères (ronds jaunes). Des buttes

noachiennes enrichies en olivine sont également observées autour du bassin d'Hellas (étoiles violettes) et feront l'objet d'une section particulière. Dans les plaines du nord, l'olivine est principalement associée à des éjectas de cratères (ronds jaunes) et à des dunes présentes aux fonds de ces cratères (ronds bleus) ainsi qu'à de grands affleurements rocheux (étoiles vertes). Les dépôts d'olivine sur les terrasses des trois bassins Argyre, Hellas et Isidis ainsi que dans Valles Marineris sont clairement visibles sur cette carte et nous n'avons donc pas utilisé de symbole précis pour les représenter.

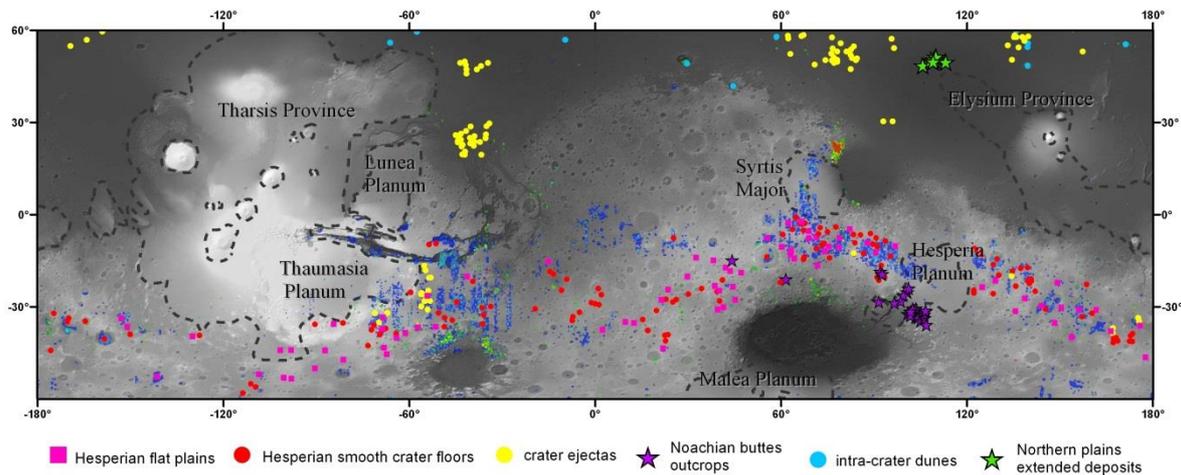


Figure 67. Localisation des dépôts enrichis en olivine étudiés en détail dans cette partie, superposés à la carte d'altimétrie MOLA. Les régions volcaniques définies par Werner et al., [2009] sont délimitées en trait pointillé noir pour pouvoir comparer leurs localisations à celles des dépôts d'olivine.

4.2.1 Dépôts d'olivines dans les anciens terrains de l'hémisphère sud

4.2.1.1 Contexte géologique

L'analyse à l'échelle locale des dépôts d'olivine détectés dans les terrains de l'hémisphère sud a montré que ces derniers étaient principalement associés à des plaines et à des fonds de cratères plats et à l'aspect lisse à grande échelle souvent associés géographiquement (« smooth plains » et « smooth crater floor »). Ces plaines et fonds de cratères sont essentiellement observés dans les régions riches en pyroxènes et peu poussiéreuses mentionnées dans la section 3.5.3. Cependant, d'autres ont été identifiés dans des régions plus poussiéreuses telles que Noachis Terra et Aonia Terra en diminuant le seuil de détection du critère d'olivine. L'olivine est également associée à des éjectas de cratères dans les régions de Bosporos Planum, Protei Planum et Terra Cimmeria. Ces éjectas de cratères enrichis en olivine sont toujours associés à des plaines lisses du même type que les précédentes, mais pouvant montrer des signatures d'olivine faibles ou inexistantes. Des éjectas de cratères enrichis en olivine sont également détectés dans les régions volcaniques de Syrtis Major, de Thaumasia Planum et d'Hesperia Planum mais leur relation avec les autres n'étant pas claire ils ne seront pas étudiés. Nous considérerons ici que les cratères, plaines et éjectas de cratères enrichis en olivine observés dans les terrains du sud ne sont pas en relation avec les provinces volcaniques majeures mises en évidence par *Werner et al.*, [2009] (Figure 67).

Des exemples d'observations OMEGA pour deux plaines enrichies en olivine sont présentés sur les Figure 68 et Figure 69. Une comparaison avec la carte géologique de l'USGS montre que ces plaines sont souvent associées aux unités hespériennes Hr, Hpl3 et Hplm. L'unité Hr a déjà été présentée dans les sections 1.2 et 1.3.3.2 comme correspondant à des

plaines ridées d'origine volcanique ("ridged plains unit") observables un peu partout dans les terrains de l'hémisphère sud (Figure 4) et présentant des rides de compressions typiques des régions volcaniques [Leverington and Maxwell, 2004; Skinner et al., 2006]. Les unités Hpl3 et Hplm sont des unités très proches morphologiquement bien qu'elles ne présentent pas de rides de compressions et sont définies comme des plaines lisses ("smooth plains unit"). Certaines de ces plaines sont également observées dans des terrains répertoriés comme Noachien par la carte USGS [Skinner et al., 2006]. Toutes ces plaines, même celles associées à des unités noachiennes, semblent cependant moins cratérisées que les terrains adjacents stratigraphiquement plus hauts et plus dégradés. De plus, ces plaines semblent épouser ces terrains en certains endroits (Figure 68E et Figure 69E). Ces observations suggèrent que ces plaines se soient formées à partir d'un matériau enrichi en olivine ayant rempli les dépressions présentes dans les terrains sous-jacents plus vieux.

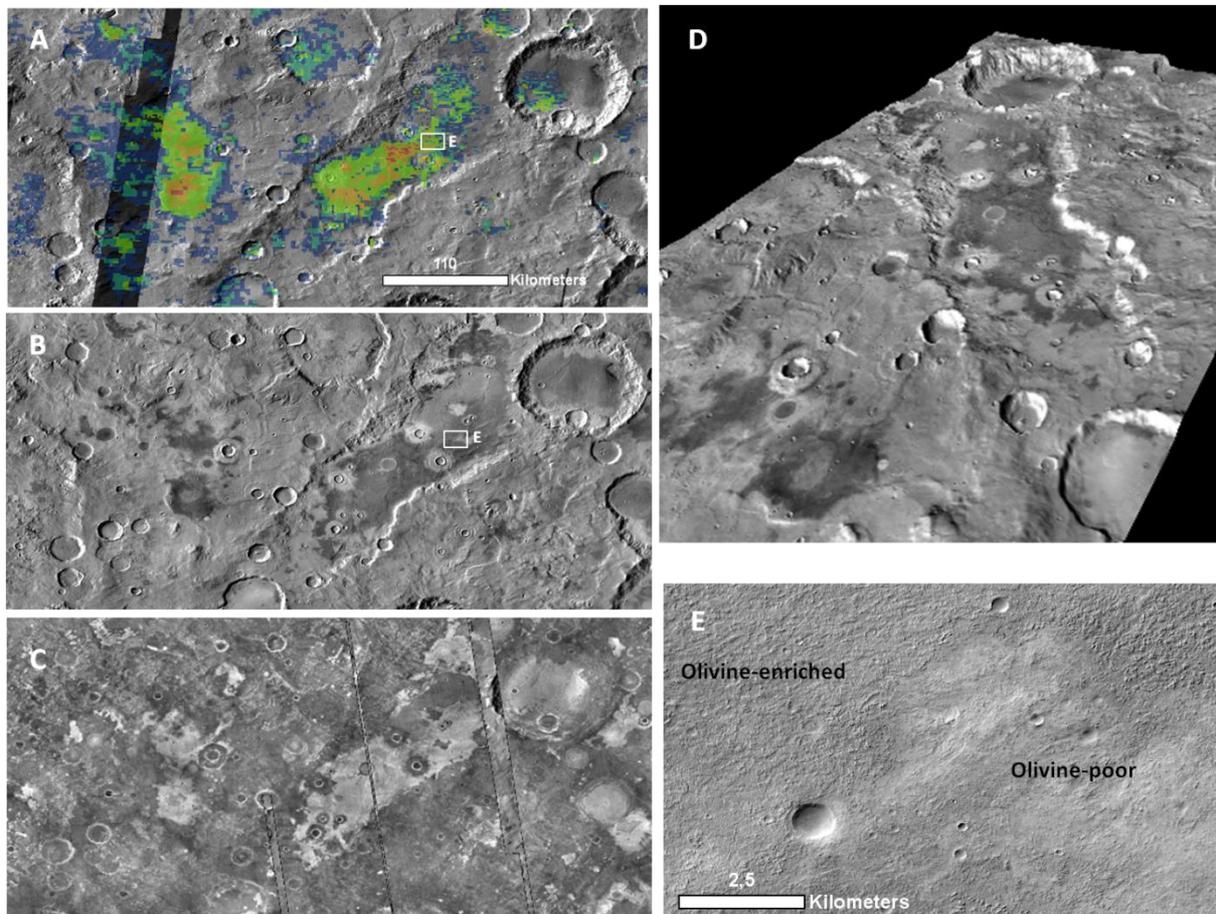


Figure 68. Exemple de plaine (unité Hplm) et de fonds de cratères enrichis en olivine dans les terrains de l'hémisphère sud [12.55°E, 35.4°S]. (A) Detections d'olivine superposées à la mosaïque THEMIS de jour ; (B) Mosaïque THEMIS IR de jour ; (C) Mosaïque THEMIS IR de nuit ; (D) Vue 3D de cette région avec une exagération verticale de 5 ; (E) Gros plan CTX de la zone encadrée en blanc sur les figure (A) et (B) et illustrant la transition entre un terrain enrichi en olivine et un terrain pauvre en olivine.

Ces plaines sont très bien caractérisées sur les mosaïques THEMIS IR par des températures plus faibles de jour et plus importantes de nuit que les terrains environnants, suggérant une inertie thermique plus importante que ces derniers (Figure 68B et C et Figure 69B et C). Cette inertie thermique plus élevée est en accord avec la morphologie plutôt incompétente et la texture rugueuse et criblée qu'on peut observer à haute résolution spatiale sur les images CTX, ainsi qu'avec l'absence ou la quasi-absence de matériau éolien (Figure 68E

et Figure 69E). Ce type de texture a déjà été observé dans de nombreux endroits dans les terrains du sud [Edwards et al., 2009] ainsi que dans Eos Chasma, Ares vallis, dans le cratère de Gusev et dans le sud du bassin d'Isidis toujours associé à une plus forte inertie thermique que les terrains voisins [Edwards et al., 2008; Rogers et al., 2005; Ruff et al., 2007; Tornabene et al., 2008].

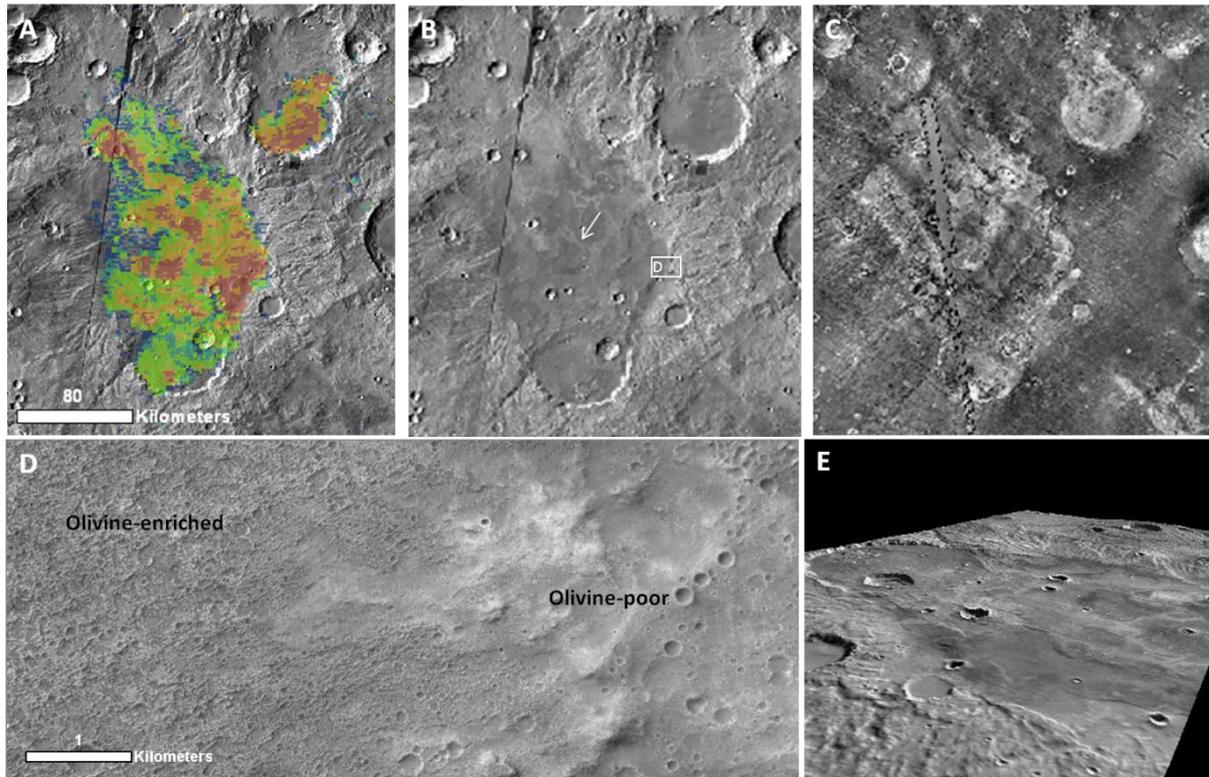


Figure 69. Illustration d'une plaine ridée (Hr) et d'un fond de cratère enrichi en olivine dans les terrains de l'hémisphère sud [128.9°E, 21.6°S]. (A) Detections d'olivine superposées à la mosaïque THEMIS IR de jour; (B) Mosaïque THEMIS de jour; (C) Mosaïque THEMIS IR de nuit; (D) Vue 3D de cette région avec une exagération verticale de 5; (E) Gros plan CTX de la zone encadrée en blanc sur la figure (B) et illustrant la transition entre un terrain enrichi en olivine et un terrain pauvre en olivine. La flèche blanche sur la figure (B) indique la présence d'une ride de compression formée par des contraintes tectoniques et typique des régions volcaniques.

On peut observer que les variations dans les signatures d'olivine observables sur ces plaines sont généralement bien corrélées aux petites variations de sa température de nuit THEMIS, les plus fortes signatures étant associées aux plus fortes températures. Ceci peut suggérer une différence dans le degré d'érosion de la surface et/ou la présence d'une couverture de matériau non consolidé pauvre en olivine.

Ces variations sont parfois très importantes et certaines plaines ne semblent que partiellement enrichies en olivine. La Figure 70 illustre une plaine ridée (unité Hr), située juste sous Valles Marineris, qui ne présente des signatures d'olivine importantes que pour des petites zones bien définies à plus haute température de nuit et faible température de jour i.e à plus haute inertie thermique. Les autres parties de la plaine montrent des signatures d'olivine très faibles ou inexistantes et des propriétés physiques similaires à celles des terrains noachiens adjacents. L'image CTX présentée sur la Figure 70E montre que les zones à haute inertie thermique et fortes signatures d'olivine ont une texture rugueuse et criblée similaire à celle des plaines illustrées sur les Figure 68 et Figure 69. Les zones pauvres en olivine montrent une texture moins rugueuse suggérant qu'elles correspondent à des zones moins érodées et/ou recouvertes d'un matériau formé de fines particules. Les deux régions enrichies ou pauvres en

olivine illustrées sur cette image CTX semblent avoir un taux de cratérisation similaires et donc un âge similaire confirmant qu'elles appartiennent bien toutes les deux à la même unité i.e. plaine ridée hespérienne. Ces observations suggèrent que la plaine entière pourrait être enrichie en olivine et que les signatures soient masquées en certains endroits par un matériau formé de particules fines moins riches en olivine provenant probablement des terrains noachiens. Cette hypothèse est appuyée par la présence d'éjectas de cratères riches en olivine dans les régions pauvres en olivine, confirmant la présence d'olivine dans le sous-sol de ces régions (Figure 70F). Des plaines montrant les mêmes caractéristiques sont couramment observées dans les terrains de l'hémisphère sud et nous considérons ici qu'elles sont toutes entièrement enrichies en olivine et que leurs signatures sont en partie masquées par des fines particules moins riches en olivine provenant des terrains environnants.

Un autre exemple de plaine enrichie en olivine illustré sur la Figure 71 montre cependant que la corrélation entre forte signature d'olivine et haute inertie thermique n'est pas toujours vraie. En effet, cette plaine montre à l'inverse de celles précédemment décrites des signatures d'olivine importantes associées à la région de plus faible température de nuit. Cette région est située au centre de la plaine et est entourée d'une bordure de plus haute température de nuit montrant des signatures d'olivine plus faibles. Ceci implique que dans ce cas l'olivine est associée à un terrain moins consolidé ou formé de matériau granuleux. Ceci est confirmé par la présence sur la surface de petites dunes ondulées appelées "ripples dunes" (Figure 71D). Ces petites dunes ondulées se forment en général sur place à partir de l'érosion de la surface sous-jacente. Dans ce cas, elle serait donc le résultat de l'érosion de la plaine enrichie en olivine et de haute inertie thermique telle qu'on l'observe dans les régions externes non recouvertes de dunes. Cet exemple démontre que contrairement à ce qui est suggéré par *Bandfield et al.*, [2011], les sols sablonneux ne sont pas toujours plus pauvres en olivine que les roches dont ils sont issus. Cet enrichissement en olivine dans le sable relativement à sa source est également observable en Islande et pourrait s'expliquer par un mécanisme de ségrégation préférentiel de l'olivine dans le sable par rapport aux autres minéraux (plagioclase, pyroxène) du fait de la taille et de la forme initiale des grains dans la roche, de sa dureté et de sa densité [*Mangold et al.*, 2011].

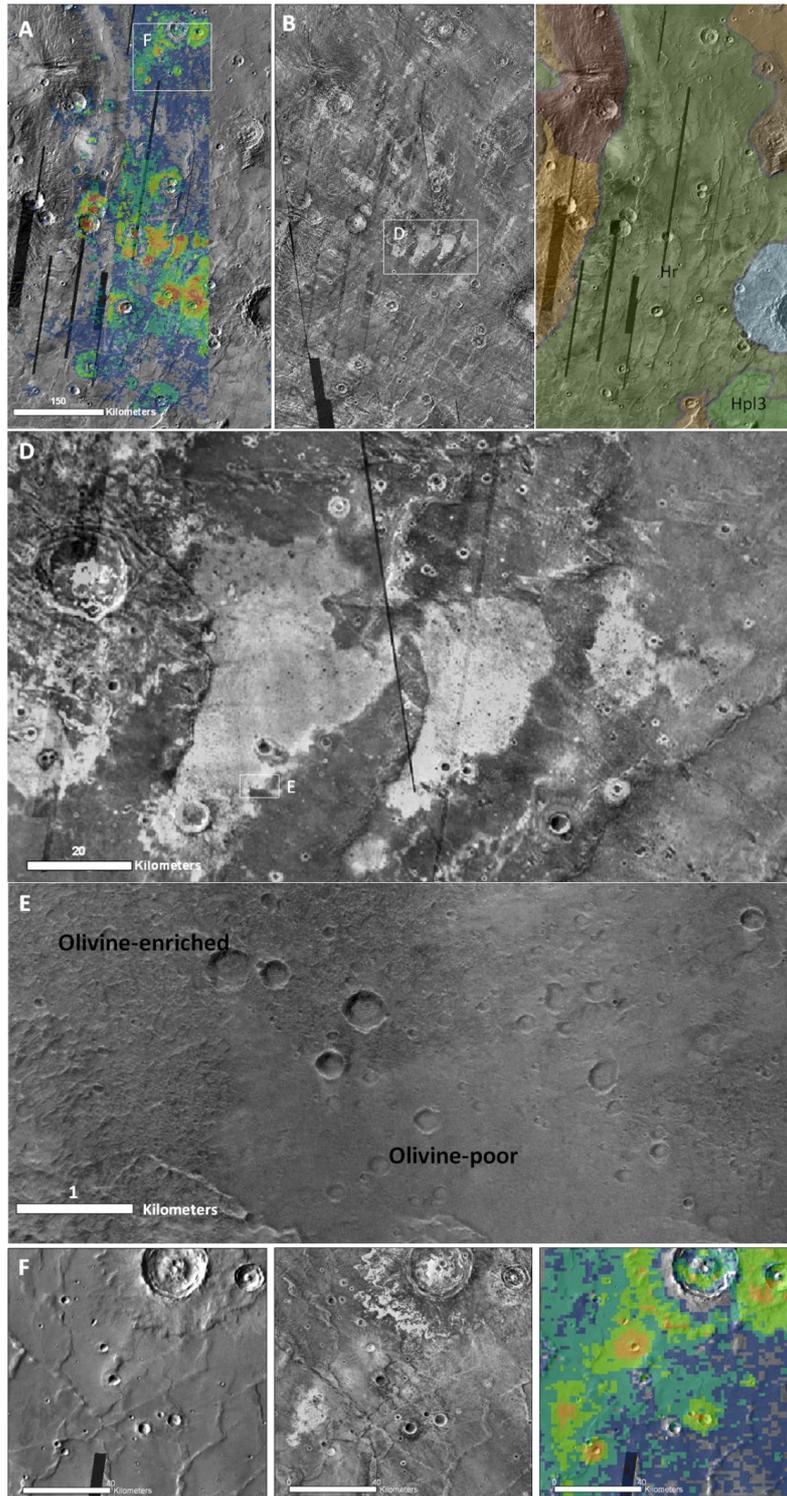


Figure 70. Plaines ridées (Hr) montrant des variations importantes dans les signatures d'olivines associées aux variations d'inertie thermique [-54.1°E, 23.4°S]. (A) Détections d'olivine superposées à la mosaïque THEMIS IR de jour ; (B) Mosaïque THEMIS IR de nuit ; (C) Carte géologique USGS montrant les différentes unités présentes dans cette région (vert : plaines ridées hespériennes (Hr) et plaines lisses hespériennes (Hpl3) ; marron : Unités noachiennes ; gris : matériau relié à l'impact [Skinner et al., 2006] ; (D) gros plan sur la zone encadrée en blanc sur la mosaïque THEMIS IR de nuit (figure (B)) ; (E) Gros plan CTX sur la limite entre les terrains enrichis en olivine et les terrains montrant des très faibles signatures (encadré blanc sur la figure (D)) ; (F) de gauche à droite, gros plan sur la mosaïque THEMIS IR de jour, la mosaïque THEMIS IR de nuit et la carte d'olivine au niveau des éjectas enrichis en olivine situés au nord de cette plaine (encadré blanc sur la figure (A)).

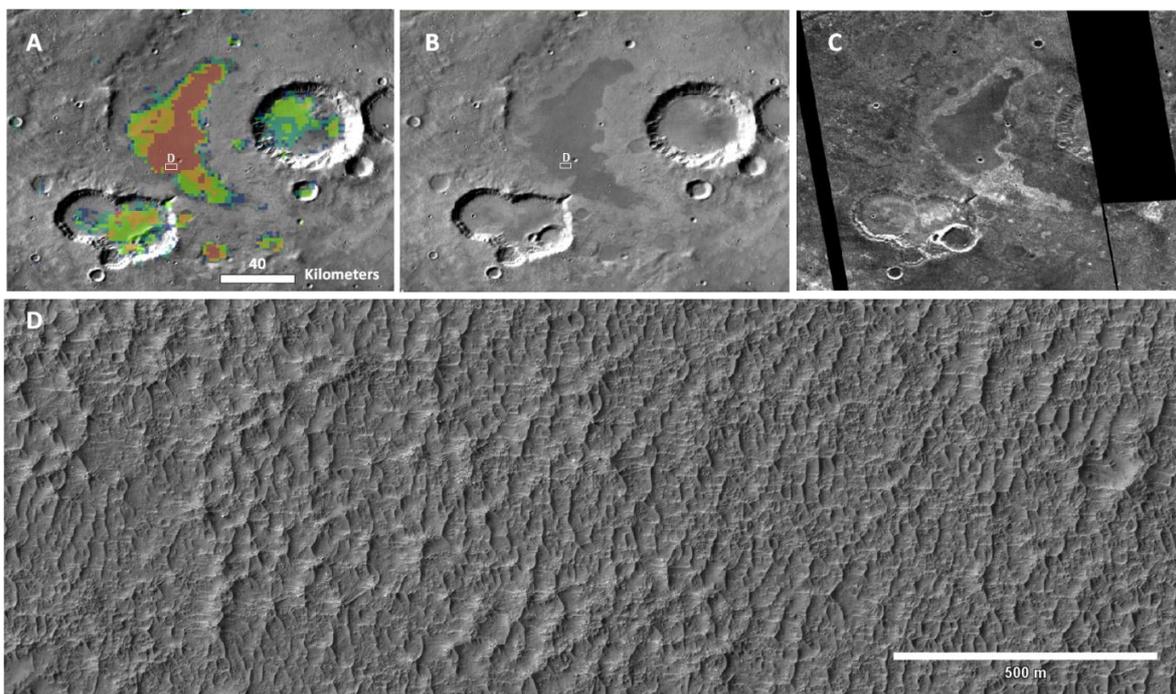


Figure 71. Illustration d'une plaine (unité Hpl3) montrant une faible inertie thermique et de fonds de cratères enrichis en olivine dans les terrains de l'hémisphère sud [291.2°E, 37.2°S]. (A) Détections d'olivine superposées à la mosaïque THEMIS IR de jour ; (B) Mosaïque THEMIS de jour ; (C) Mosaïque THEMIS IR de nuit ; (D) Gros plan HiRISE sur la zone encadrée en blanc sur les figures (A) et (B) située dans la zone à faible inertie thermique et montrant des petites dunes ondulées présentes sur la surface (« ripples dunes »)

Ces plaines enrichies en olivine sont souvent observées à proximité de cratères à la morphologie particulière présentant un fond plat sans pic central et partiellement ou entièrement enrichi en olivine. Ces cratères sont observés à travers tous les terrains de l'hémisphère sud avec un diamètre allant de 10 à plus de 400 kilomètres de diamètre (rond rouge sur la Figure 67). Ils sont principalement détectés dans les terrains Noachiens ou dans des unités géologiques définies comme étant des fonds de cratères lisses (« smooth crater floor », unité « s »), mais non datées. Les fonds de ces cratères semblent cependant moins cratérisés que les terrains noachiens dans lesquels ils sont observés suggérant un âge plus jeune. Ils sont de plus généralement caractérisés par une forte température de nuit et une faible température de jour et donc une grande inertie thermique. Ce type de cratères enrichis en olivine a déjà été observé dans certaines régions des terrains du sud à partir des données TES, THEMIS et CRISM [Koeppen and Hamilton, 2008 ; Rogers and Ferguson, 2011 ; Goudge et al., 2011].

Un exemple typique de ces cratères est illustré sur la Figure 72. Son fond plat montre une texture consolidée et rugueuse très similaire à celle observée sur les plaines présentées précédemment et aucune dune n'est observée à la résolution CTX (Figure 72D). On peut observer la présence de rides de compression au centre du cratère et de lobes à la périphérie qui sont indiqués sur la Figure 72 par des flèches. De même que pour les plaines, le matériau formant le fond du cratère semble épouser la bordure du cratère (Figure 72D). Une vue 3D de ce cratère est présentée sur la Figure 72C et montre que la profondeur du cratère est très faible par rapport à sa taille. En effet, d'après la relation de Smith et al., [2001]² ce cratère de ~76km de diamètre devrait avoir une profondeur d'environ 3km, contre seulement 800m mesurée avec

² Relation reliant la profondeur du cratère d à son diamètre D d'après Smith et al., [2001] : $d=0.33D^{0.53}$

MOLA. Ceci suggère qu'il ait été rempli par du matériau sur environ 2km, recouvrant le fond du cratère originel ainsi que la totalité du pic central et formant ainsi la surface plate observée. Cette faible profondeur est une caractéristique commune à tous les cratères montrant un fond plat enrichi en olivine suggérant que leur remplissage ait été le résultat d'un processus global.

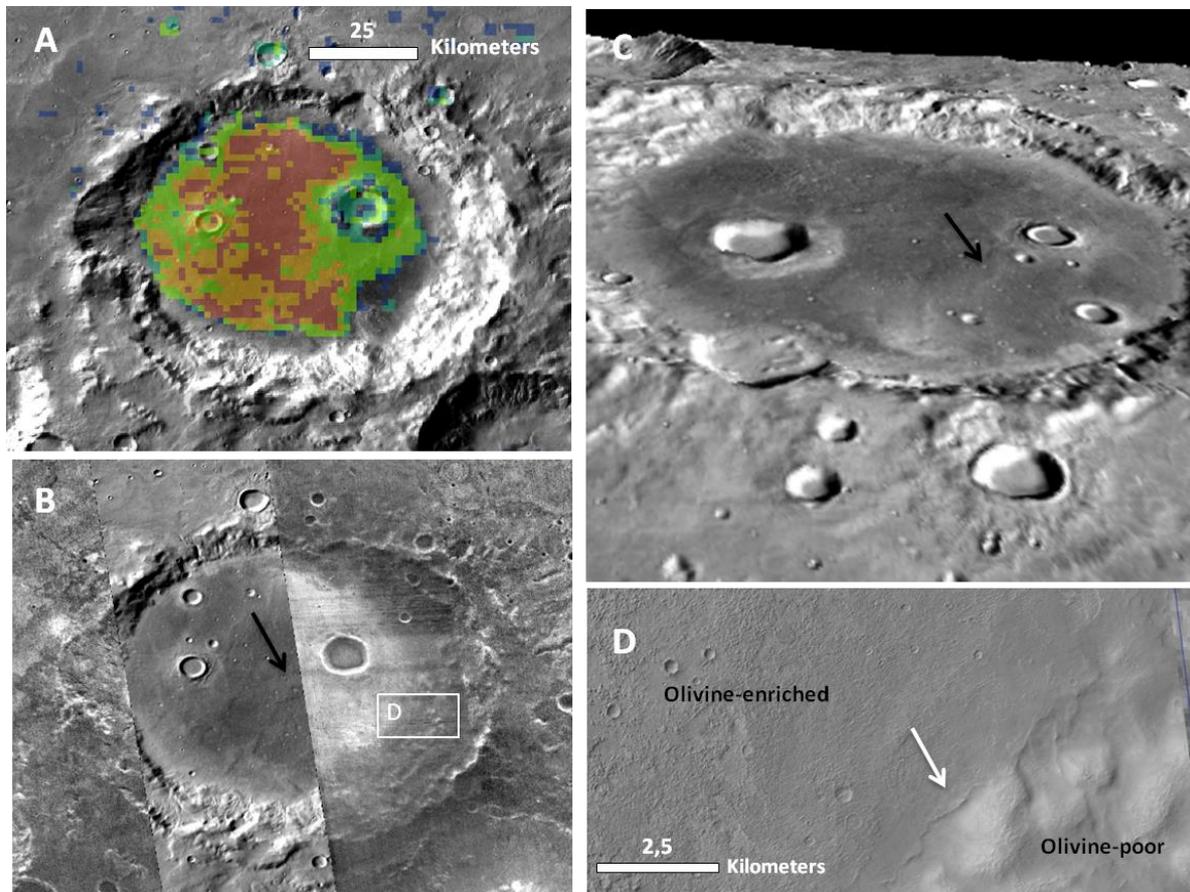


Figure 72. Illustration des caractéristiques typiques des fonds de cratères enrichis en olivine observés dans les terrains de l'hémisphère sud [-71.6°E, 36°S]. (A) Détections d'olivine superposées à la mosaïque THEMIS IR de jour ; (B) Mosaïque THEMIS de nuit sur la partie droite du cratère et mosaïque THEMIS IR de jour sur la partie gauche. (C) Vue 3D du cratère avec une exagération verticale de 5. Une ride de compression est indiquée par une flèche noire ; (D) Gros plan CTX sur la transition entre le fond du cratère enrichi en olivine et le bord du cratère pauvre en olivine. Un lobe à la périphérie du cratère est indiqué avec une flèche blanche.

Comme nous l'avons mentionné plus haut, certains de ces cratères à fond plat et peu profond ne montrent des signatures d'olivine que pour certaines portions de leur surface et ne semblent donc que partiellement enrichis en olivine. Sur le cratère illustré sur la Figure 73 par exemple, les signatures d'olivine sont restreintes au croissant qui forme la partie externe ouest de son fond. Cette zone montre une température de nuit élevée et une température de jour faible résultant d'une forte inertie thermique en accord avec l'aspect très érodé et la texture rugueuse que montrent les images CTX (Figure 73E). La partie centrale du cratère, pauvre en olivine et d'albédo sombre, semble surélevée par rapport au croissant ouest enrichi en olivine (Figure 73D) et montre une texture plus lisse. Cette zone présente également une inertie thermique plus faible suggérant la présence d'une couche de matériau non consolidé et/ou formé de particules plus fines. Ce matériau est également observé au niveau des dépressions dans le croissant érodé et enrichi en olivine. La partie centrale d'aspect plus lisse pourrait donc représenter une zone moins érodée de la surface enrichie en olivine formant le fond du cratère et dont les signatures

seraient masquées par la présence d'une couche de matériau de plus faible inertie thermique provenant probablement des terrains environnants moins riches en olivine. Ce matériau étant concentré dans les dépressions au niveau de la zone érodée, il laisse apparaître les signatures de l'olivine présente sur les sommets. Dans ce cas, ce cratère pourrait donner une limite inférieure à l'épaisseur de la couche d'olivine suggérant que celle-ci ne soit pas uniquement superficielle. Cependant, cette couche centrale peut aussi être interprétée comme étant formée d'un manteau épais et résistant pauvre en olivine qui se serait formé sur la couche d'olivine. Ce manteau aurait été ensuite en partie érodé, laissant apparaître à l'ouest le fond du cratère enrichi en olivine. Quelle que soit l'hypothèse, ces observations suggèrent que les variations dans les signatures d'olivine ne sont pas le résultat d'un remplissage partiel du cratère par du matériau enrichi en olivine, mais plutôt celui d'un remplissage de la totalité du cratère qui a ensuite été en partie recouvert.

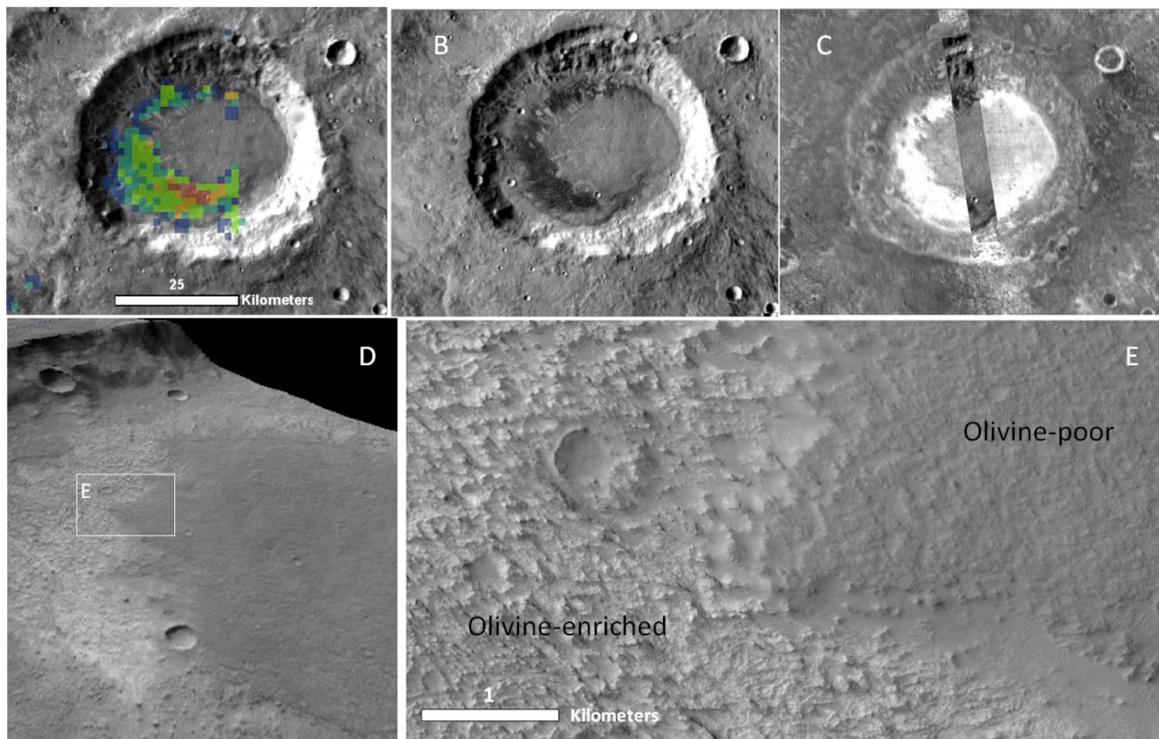


Figure 73. Exemple d'un fond de cratère à haute inertie thermique enrichi en olivine en partie recouvert par du matériau à plus faible inertie thermique. (A) Détections d'olivine superposées à la mosaïque THEMIS de jour ; (B) Mosaïque THEMIS de jour ; (C) Mosaïque THEMIS IR de nuit ; (D) Vue 3D de la partie ouest du fond du cratère avec une exagération verticale de 15 ; (E) Gros plan CTX illustrant la transition entre la zone enrichie en olivine à haute inertie thermique et la zone pauvre en olivine à faible inertie thermique.

Certains de ces cratères présentent de l'olivine associée à des bancs de sables ou à des dunes relativement sombres par rapport aux autres dépôts d'olivine (Figure 74). Le fait que de l'olivine soit également détectée associée à une plaine présente juste à côté du cratère et visible en haut à gauche de la Figure 74A pourrait suggérer que le sable riche en olivine présent dans le cratère provienne de l'érosion de cette plaine et ait été transporté jusque dans le cratère. Cependant une étude de *Tirsch et al.*, [2011] a montré que la plupart des dunes ou bancs de sables sombres présents dans les cratères avaient une origine locale provenant de l'érosion d'une couche ou d'affleurements présents dans les murs ou dans le fond du cratère. Bien que les signatures soient difficilement vérifiables visuellement à cause de la présence d'eau et de poussière, les rapports de spectres indiquent qu'une petite zone localisée à l'opposé des dunes

ou bancs de sables pourrait être enrichie en olivine (Figure 74C), ce qui soutiendrait l'hypothèse d'une origine locale. Cette zone montre une texture plus rugueuse et plus érodée que le reste de la surface formant le fond du cratère et pourrait donc, bien qu'aucun lien direct ne soit visible, être la source du sable enrichi en olivine. On peut également observer ce type de surface érodée au même endroit que le champ de dunes observé sur la Figure 74B, cependant à la résolution d'OMEGA il n'est pas possible de déterminer si les signatures d'olivine dans cette région proviennent de cette surface érodée, des dunes ou des deux. Bien que le lien ne soit pas prouvé ici, nous considérerons néanmoins que le sable riche en olivine présent dans ce cratère ainsi que dans tous les cratères au fond plat et peu profond sont d'origine locale et formé à partir de l'érosion du matériau enrichi en olivine qui aurait rempli le cratère. Le fait que l'olivine ne soit associée qu'au sable ou à des zones érodées suggère que le fond visible du cratère est en partie recouvert d'une couche plus ou moins épaisse et consolidée de matériau pauvre en olivine provenant des terrains dégradés environnants comme observés dans l'exemple de la Figure 73.

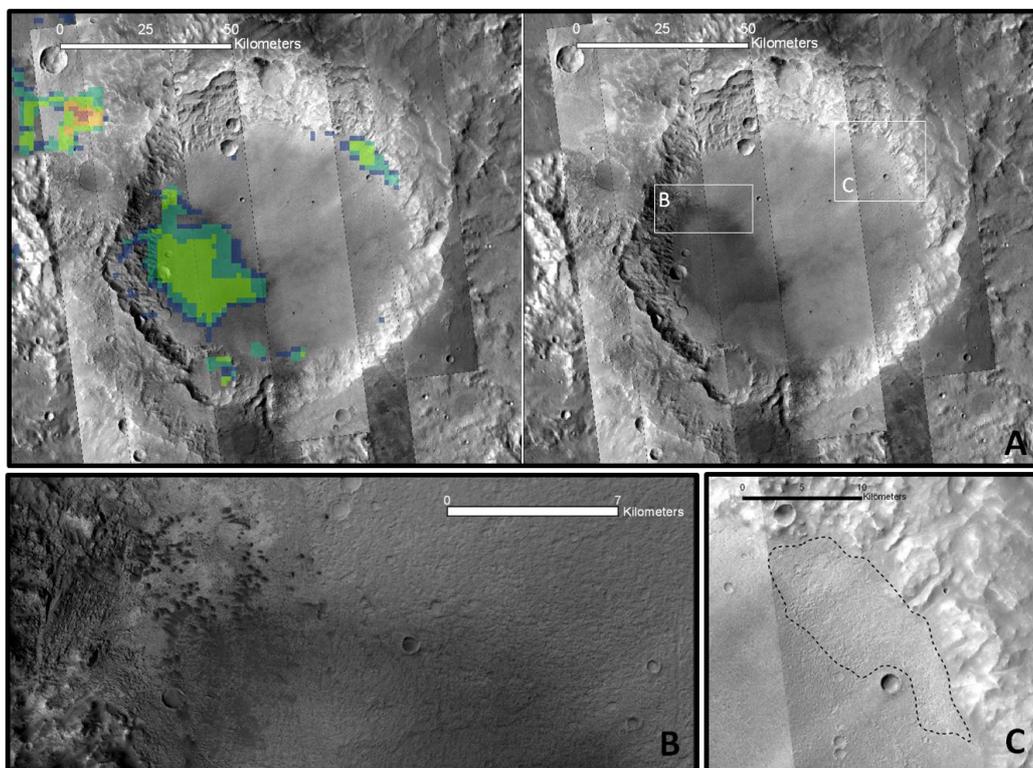


Figure 74. Exemple de dunes et d'un banc de sable enrichis en olivine accumulés au fond d'un cratère localisé dans la région de Terra Tyrrhena [67.7°E, 2.9°S]. (A) Détections d'olivine superposées à une mosaïque d'images CTX et comparées à la mosaïque CTX seule ; gros plans CTX sur les deux zones enrichies en olivines encadrées en blanc sur la figure (A) : dunes et banc de sable (B), zone érodée (C).

Ces trois exemples de cratères résument les principales morphologies observées pour les cratères enrichis en olivine détectés dans les terrains du sud. Un schéma résumant les processus interprétés comme étant à l'origine de leur formation est présenté sur la Figure 75.

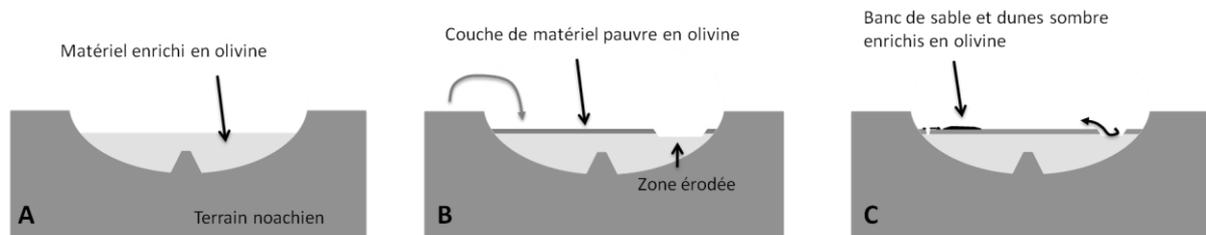


Figure 75. Schémas illustrant les trois principaux types de dépôts d'olivine observés dans les fonds de cratères des terrains de l'hémisphère sud ainsi que les processus impliqués dans leur formation. (A) : remplissage du cratère par un matériau enrichi en olivine à la morphologie résistante (morphologie du cratère de la Figure 72). Ici, nous faisons l'hypothèse que tout le cratère est rempli par du matériau enrichi en olivine mais il serait également possible que ce matériel ne forme que la couche supérieur est soit superposé à du matériau d'une origine différente qui aurait rempli le cratère au préalable; (B) : (A) + formation d'une couche de matériau pauvre en olivine provenant probablement des terrains environnants sur le fond de cratère enrichi en olivine. Cette couche est ensuite en partie érodée et laisse apparaître le matériau enrichi en olivine sous-jacent (morphologie du cratère de la Figure 73); (C) : (B) + Formation de dunes et de banc de sable à partir du matériau érodé depuis la zone enrichie en olivine (morphologie du cratère de la Figure 74).

4.2.1.2 Période de formation

Nous avons vu dans la section précédente que les dépôts d'olivine observés dans l'hémisphère sud pouvaient être associés à deux types de terrains: des terrains hespériens au travers des unités Hr, Hpl3 et Hplm auxquelles sont associées la plupart des plaines enrichies en olivine, mais également à des terrains datés du Noachien par *Skinner et al.*, [2006] dans lesquels sont observées quelques plaines et la plupart des cratères enrichis en olivine. Cependant, nous avons également observé que tous ces terrains enrichis en olivine, quelle que soit la période géologique à laquelle ils sont associés, montraient un taux de cratérisation assez similaire et plus faible que les terrains noachiens suggérant un âge plus jeune. Comme nous l'avons déjà mentionné plus haut, la carte géologique USGS sur laquelle est basée cette étude a été construite à partir des données Viking qui n'étaient pas appropriées pour faire une datation précise de si petites surfaces. Cette datation étant maintenant possible grâce aux données à haute résolution acquises depuis, nous avons décidé de dater de façon précise un échantillon de ces dépôts selon la méthode détaillée dans la section 4.1.4. Cette méthode de datation est illustrée sur la Figure 76 pour des cratères et des plaines enrichis en olivine de la région de Terra Tyrrhena. On peut observer que quelque soit l'unité à laquelle sont rattachés ces terrains enrichis en olivine, ils ont tous un âge autour de ~3.7 Ga ce qui correspond à la période du début Hespérien et est en accord avec l'âge des unités Hr, Hpl3 et Hplm dans lesquelles les plaines sont observées. La Figure 77 répertorie les âges calculés pour les 18 cratères (croix rouge) et les 8 plaines (croix bleues) enrichies en olivine qui ont été datés dans cette étude en fonction de leur longitude. Cette figure montre la même tendance que la Figure 76 avec des âges principalement compris entre 3.6 et 3.8 Ga soit le début de l'Hespérien. Certains fonds de cratères sont cependant datés jusqu'à 3.9-4.0 Ga et 3.5 Ga suggérant que certains de ces dépôts se soient formés pendant la fin du Noachien et pendant le milieu de l'Hespérien. Cet intervalle d'âge de formation semble être le même pour les plaines et les cratères et aucune tendance dans l'âge de ces unités n'est observée avec la longitude. Ces résultats suggèrent que ces plaines et ces fonds de cratère enrichis en olivines se soient formés à la même époque et reflètent un processus planétaire.

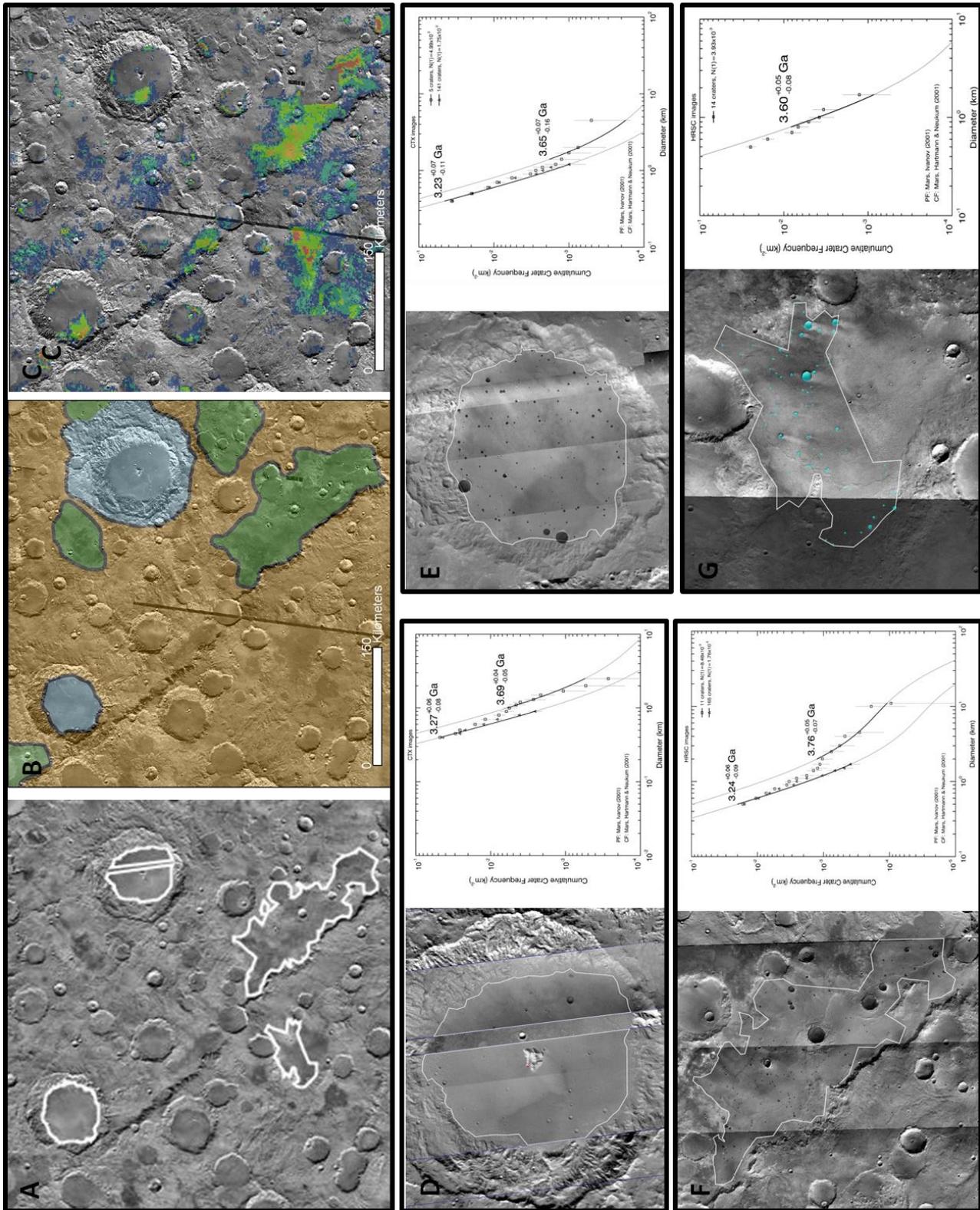


Figure 76. Exemples de datation par la méthode du comptage de cratères pour des plaines et de fonds de cratères enrichis en olivine dans la région de Terra Tyrrena. (A) Mosaïque THEMIS de jour avec les plaines et fond de cratères datés entourés en blanc ; (B) Carte géologique USGS dans la même région avec en marron les unités noachiennes, en vert les unités hespériennes et en gris les terrains reliés à du matériau volcanique [Skinner et al., 2006].

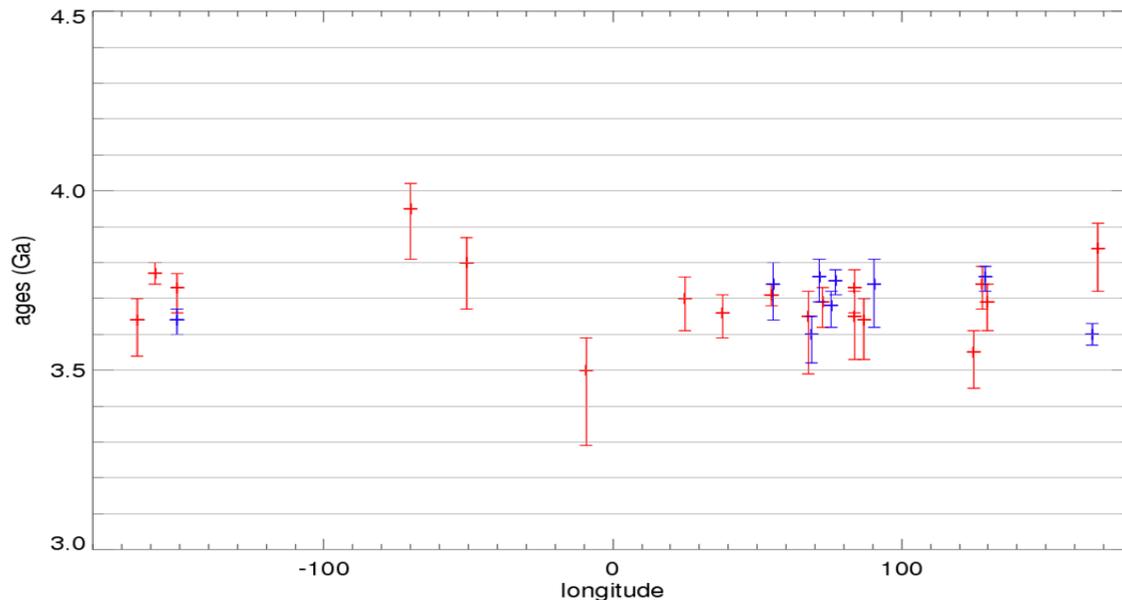


Figure 77. Age des plaines (croix bleue) et des fonds de cratère (croix rouge) enrichis en olivine datés dans cette étude en fonction de leur longitude.

4.2.1.3 Composition

Nous avons vu dans la section 3.5.4 que les dépôts d'olivine observés dans les terrains de l'hémisphère sud présentaient les deux types 1 et 2 de composition (définis dans la section 3.5.4.1). L'étude détaillée de ces dépôts a montré que les deux types de composition étaient associés aux mêmes unités i.e fonds de cratères et plaines, les zones montrant une composition de type 2 étant des petites régions de ces unités. Nous avons vu dans les sections 3.3.3 et 3.5.4 que ces variations pouvaient être interprétées en matière de teneur en fer et/ou taille de grain et/ou abondance. Les régions localisées de type 2 montrent souvent une texture plus rugueuse et plus érodée que les régions de plus faibles signatures, mais semblent être faites du même matériau, la taille des grains et/ou la teneur en fer de l'olivine devraient donc être identiques pour les régions de faibles et de fortes signatures d'olivine et ne sont donc pas responsables de ces variations. De manière générale, les régions de type 2 montrent une inertie thermique plus importante que les régions de type 1 suggérant la présence d'un matériau non consolidé et/ou formé de petites particules sur ces dernières. En se basant sur ces observations, nous attribuons les variations des signatures d'olivine observables sur la majorité des dépôts de l'hémisphère sud à un effet d'abondance, non pas au niveau de l'abondance en olivine du matériau formant les dépôts, mais résultant de la présence sur ces dépôts d'une couche hétérogène de fines particules pauvres en olivine et/ou enrichies en pyroxène provenant des terrains noachiens environnants. En effet, nous avons vu à plusieurs reprises dans les sections précédentes que le pyroxène avait pour effet de déformer et de diminuer la profondeur de bande de la bande d'absorption à $1\mu\text{m}$ de l'olivine. Un bon exemple pour illustrer ces variations spectrales est la plaine hespérienne enrichie en olivine déjà présentée sur la Figure 70 qui montre des variations claires dans ses signatures d'olivine très bien corrélées aux variations d'inertie thermique. L'évolution des signatures spectrales quand on passe des régions pauvres en olivines aux régions enrichies en olivine de cette plaine est illustrée sur la Figure 78. On peut remarquer que tous les spectres issus de cette plaine ainsi que celui issu des terrains noachiens adjacents montrent une signature de pyroxène centrée à $\sim 2.2\mu\text{m}$ indiquant que les variations de la bande à $1\mu\text{m}$ observables ne sont pas dues à des variations dans le type de pyroxène, mais bien à la présence d'olivine. Cette évolution met clairement en évidence l'anticorrélation entre la force de la bande à $2\mu\text{m}$ du pyroxène et celle de la bande d'absorption à $1\mu\text{m}$ de l'olivine

confirmant le rôle majeur du pyroxène dans les variations de la signature d'olivine. Ainsi les régions de types 2 (fort critère OSP2 (Figure 78A) ou détections rouges (Figure 78B)) montrent une forte inertie thermique, une profondeur de bande à $2\mu\text{m}$ très faible et une bande d'absorption à $1\mu\text{m}$ importante (spectre rouge) suggérant qu'elles ne soient pas ou très peu recouvertes de particules de pyroxène. A l'inverse les terrains de type 1 (moyennes à faibles valeurs de OSP2 (Figure 78A) ou détections bleues (Figure 78B)) montrent une inertie thermique plus faible ainsi qu'une augmentation de la profondeur de bande à $2\mu\text{m}$ et une diminution de la profondeur de bande à $1\mu\text{m}$ qui est décalée vers les petites longueurs d'onde (spectre verte). Ceci suggère la présence de particules de pyroxène en plus grande quantité que pour les régions de type 2. Ces effets s'amplifient quand on observe les zones de très faibles valeurs du critère OSP2 (sous le seuil de détection à 1.04, spectre violet), résultant d'une quantité très importante de fines particules de pyroxène. La différence entre le spectre issu de ces régions (spectre violet) et le spectre issu des terrains noachiens reste néanmoins discernable. Les rapports de spectres issus de ces trois types de régions sont présentés sur la Figure 78D et confirment la présence d'olivine même dans les régions aux très faibles valeurs de critère OSP2 (spectre violet). Pour ne pas alourdir cette section ainsi que les figures présentées précédemment, nous avons mis les rapports de spectres des différents dépôts d'olivine illustrés dans cette section dans l'annexe 1. Les évolutions spectrales issues de la plupart de ces dépôts ainsi que de la plupart des dépôts hespériens enrichis en olivine étudiés mais non illustrés dans cette thèse montrent les mêmes tendances que celles illustrées sur la Figure 78.

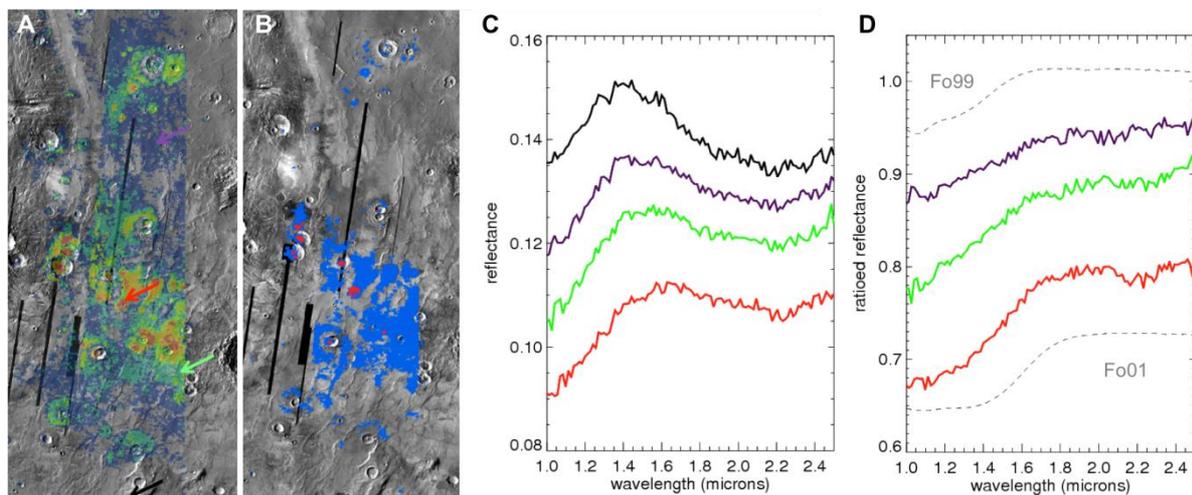


Figure 78. (A) Détections d'olivine (critère OSP2) superposées à la mosaïque THEMIS de jour autour d'une plaine ridée située au sud de Valles Marineris ; (B) même région, mais avec les olivines de type 1 (OSP1) cartographiées en bleue et les olivines de type 2 en rouge (OSP2 et OSP3) pour la comparaison, ici seules les détections au-dessus du seuil de détection à 1.04 sont cartographiées; (C) spectres issus des régions indiquées avec des flèches de la couleur correspondante sur la figure (A) ; (D) Rapports de spectres obtenus en divisant les spectres de la figure (C) par le spectre noir issu de la zone pauvre en olivine située au sud de la plaine.

Les zones de type 2 observées dans certains dépôts d'olivine de l'hémisphère sud sont donc interprétées comme étant peu ou pas recouvertes de fines particules de pyroxène provenant des terrains adjacents. On peut donc considérer que les spectres issus de ces régions correspondent à la composition réelle du matériau enrichi en olivine qui a formé ces dépôts durant le début de la période hespérienne. Ceci implique que contrairement à ce qui est observé à l'échelle globale, tous les dépôts d'olivine des terrains de l'hémisphère sud seraient plutôt de composition de type 2 i.e. avec une teneur en fer et/ou une taille des grains et/ ou une abondance importante. Ces spectres montrent en général une signature de pyroxène à $2\mu\text{m}$ très

faible suggérant une abondance relative en olivine importante et donc une composition mafique à ultramafique du matériau composant ces dépôts (spectres rouges Figure 78)

4.2.1.4 Origine et implications

L'olivine détectée dans les terrains de l'hémisphère sud est principalement associée à des plaines de morphologie lisse (à faible résolution) et à des cratères au fond plat et peu profond. Ces unités montrent généralement une inertie thermique plus importante que les terrains environnants suggérant une plus forte inertie thermique en accord avec leurs textures rugueuses et criblées observées sur les images CTX et HiRISE. Ces plaines et ces fonds de cratères montrent un taux de cratérisation plus faible que les terrains noachiens adjacents suggérant qu'ils soient plus jeunes. Ceci est confirmé par leurs datations précises issues d'une méthode de comptage de cratère qui délimite leurs périodes de formation à la fin Noachien-début Hespérien (3.6-3.8 Ga). La faible profondeur de ces cratères ainsi que les images CTX des plaines, qui montrent qu'elles recouvrent et enveloppent par endroits le terrain sous-jacent, suggèrent de plus que ces unités résultent du remplissage des dépressions et des cratères présents dans les terrains Noachiens. Ces unités ont donc deux origines possibles, une origine sédimentaire ou une origine magmatique. Une origine sédimentaire pour ces dépôts nécessiterait l'existence d'une source de matériau enrichi en olivine à proximité. Or ces dépôts sont observés au milieu de terrains de composition pauvre en olivine et aucune formation enrichie en olivine n'est observée dans les terrains environnants. L'origine sédimentaire pour ces dépôts est donc peu probable. Ces dépôts pourraient s'être formés à partir du magmatisme selon deux processus : des écoulements de laves en surface, ou des laves intrusives ayant formé des dépôts d'olivine sous la surface ensuite mis à jour par divers mécanismes d'érosion. Les observations faites de ces dépôts sont cependant plus en faveur de la première hypothèse. En effet, certaines de ces observations montrent des caractéristiques morphologiques telles que des rides de compressions et des lobes aux périphéries des dépôts d'olivine qui sont très similaires aux caractéristiques des mers lunaires considérées comme étant formées à partir de volcanisme fissural [Leverington and Maxwell, 2004]. Cette formation par coulées de laves extrusives est également en accord avec la définition des unités Hr associées à une grande partie des plaines enrichies en olivine et définies comme des plaines volcaniques. De plus, la composition particulière de ces dépôts, montrant un enrichissement en olivine, suggère que les laves soient arrivées en surface directement depuis le manteau sans trop de fractionnement, ce qui est en faveur d'un volcanisme fissural (voir section 1.3.1). Ces dépôts d'olivine pourraient donc s'être formés à partir d'écoulement de laves enrichies en olivine, arrivés en surface directement depuis le manteau au travers de fissures, probablement formées par les impacts durant le grand bombardement final, et qui auraient rempli les cratères ainsi que les dépressions du terrain. Cette formation par volcanisme fissural a également été proposée par Rogers And Ferguson [2011] pour expliquer l'observation avec THEMIS d'olivine associée à des cratères et à des plaines, mais dans la région de Terra Tyrrhena seulement. Ces cratères et ces plaines enrichis en olivine, également détectés avec OMEGA, montrent des morphologies similaires à ceux étudiés dans cette étude et sont répertoriés sur la Figure 67. On peut également relier les fonds de cratères plats et enrichis en olivine observés dans cette étude au cratère de Gusev étudié en détail par le rover Spirit. En effet, bien que la grande quantité de poussière qui recouvre le cratère de Gusev rende difficile la détermination de sa minéralogie à partir des données OMEGA, ce cratère montre une morphologie très similaire à celle des cratères enrichis en olivine observés dans cette étude et les résultats des différentes études ont montrés qu'il était rempli de laves enrichies en olivines datées à ~3.65 Ga [Greeley et al., 2005; section 1.2.2.2]. En extrapolant la composition des roches de Gusev à tous les dépôts hespériens enrichis en olivine, les laves

qui les ont formées pourraient s'être formées à ~75km de profondeur à partir de 20% de fusion du manteau martien [Monders et al., 2005 ; McSwenn et al., 2006; section 1.2.2.2].

Une information supplémentaire majeure qu'apporte notre étude se situe au niveau de son aspect global. En effet, cette étude montre que ce processus de remplissage des dépressions par volcanisme fissural, formant des dépôts à la composition minéralogique enrichie en olivine, n'est pas restreint à certaines régions localisées de Mars mais semble agir à une échelle globale au moins dans les terrains de l'hémisphère sud et permet d'expliquer la plupart des dépôts d'olivine détectés dans cet hémisphère. De plus, la période de formation de ces dépôts majoritairement restreinte entre 3.8 et 3.6 Ga suggère qu'ils se soient formés pendant un seul et même événement de volcanisme durant la fin du Noachien et le début de l'Hespérien. Cet événement volcanique global montre des caractéristiques très similaires à celui qui est à l'origine de la formation des mers lunaires survenue principalement entre 3.3 et 3.7 Ga et résultant du chauffage du manteau lunaire par les éléments radioactifs U, K, Th présent [Schultz and Spudis, 1983 ; Hiesinger et al., 2003 ; Wieczorek and Phillips, 2000]. Les éléments radioactifs présents dans le manteau martien pourraient donc être également à l'origine du volcanisme fissural enrichi en olivine.

Cet événement de volcanisme hespérien à l'échelle globale dans l'hémisphère sud peut être relié au pic de volcanisme hespérien discuté en section 1.3.3 et dont a résulté la formation des plaines volcaniques Hr auxquelles sont associés beaucoup des plaines enrichies en olivine ainsi que probablement le remplissage des plaines du nord par des laves [Head et al., 2002, Tanaka et al., 1988]. Cet événement de volcanisme à l'échelle globale dans l'hémisphère sud mis en évidence dans cette étude pourrait donc être planétaire et également responsable du remplissage des plaines du nord. Il sera d'ailleurs évoqué dans les sections suivantes pour expliquer une partie des dépôts d'olivine détectés dans les plaines du Nord ainsi qu'éventuellement dans Valles Marineris. Une conséquence importante de ces résultats est qu'ils augmentent le taux de resurfaçage volcanique durant le début de l'époque hespérienne par rapport à celui calculé par Tanaka et al., [1988] qui ne prenait pas en compte les cratères et la plupart des plaines à l'origine volcanique mis en évidence dans cette étude. Ceci pourrait avoir des répercussions importantes sur nos connaissances du climat martien à travers un dégazage plus important que celui estimé par Craddock and Greeley, [2009] (section 1.3.3.4) ainsi que sur la dynamique interne de la planète.

Un point important de cette étude est la différence de composition entre les plaines et fonds de cratères hespériens qui montrent un enrichissement en olivine et le régolite pauvre en olivine formant les terrains noachiens. Cette tendance a déjà été mise en évidence dans Rogers and Ferguson [2011] dans la région de Terra Tyrrenna mais notre étude montre que cette tendance est commune à tous les terrains de l'hémisphère sud. Cette différence peut avoir deux origines : une différence dans la composition originelle du matériau ayant formé ces deux types de terrains, et/ou une différence dans leur altération et/ ou dans leur resurfaçage. Ainsi il est possible que la déficience en olivine du régolite noachien par rapport aux terrains hespériens résulte de leur formation à partir d'une surface originellement pauvre en olivine. La surface de Mars étant principalement formée à partir de matériaux volcaniques (chapitre 1), ceci implique que les laves arrivées en surface à l'époque Noachienne soient moins riches en olivine que les laves hespériennes. De l'olivine a néanmoins été détectée dans les pics centraux et dans les éjectas de certains cratères observés dans les terrains noachiens [Skok et al. 2011 ; Loizeau et al., 2012] suggérant que la croûte noachienne sous-jacente soit enrichie en olivine au moins en certains endroits. De l'olivine a également été détectée dans des unités géologiques noachiennes avec OMEGA (voir section 4.2.5). Cette variation de la teneur en olivine des laves au cours de l'histoire de Mars pourrait permettre de poser de nombreuses contraintes sur la composition du manteau martien ainsi que sur sa dynamique (évolution de la température et de la pression,

source de chaleur). Ainsi, l'olivine étant le minéral qui fond à plus haute température (voir section 1.3.1.1), on pourrait se demander si cette variation ne pourrait pas refléter un refroidissement du manteau pendant le Noachien puis une réaugmentation de sa température pendant l'Hespérien entraînant une fusion partielle suffisante pour faire passer l'olivine du manteau dans le magma. Cette évolution thermique pourrait indiquer un changement des sources de chaleur du manteau, à savoir de l'accrétion aux éléments radioactifs (voir section 1.3.1). Cependant, nous avons vu dans la section 1.3.1.2 que sur Mars la présence d'olivine dans le magma pourrait dépendre en grande partie de la pression de fusion et moins de la température. Dans ce cas, la variation de la teneur en olivine dans les roches Noachienne et Hespérienne pourrait être due à une différence dans la profondeur de formation de leur magma source.

Une autre hypothèse possible serait que les terrains noachiens se soient formés à partir de laves plus évoluées arrivées en surface au travers d'un volcanisme explosif [*Bandfield et al., 2011*]. Ce volcanisme aurait pu former une couche de matériau volcanique non consolidé et pauvre en olivine sur l'ensemble des terrains noachiens et se serait alors plus facilement transformé en régolite par la suite que des laves denses telles que celle observée dans l'Hespérien [*Bandfield et al., 2011*].

De manière alternative, *Bandfield et al., [2011]* propose que les terrains Noachiens aient été beaucoup plus enrichis en olivine dans le passé et que cette olivine ait en partie disparu à la suite d'une altération mécanique et chimique globale au cours de l'histoire de Mars telle que cela a été observé dans le cratère de Gusev [*e.g. McSween et al., 2006*]. Une dissolution en milieu acide et avec un rapport eau/roche assez faible associé à une altération mécanique transformant la roche en sable a été proposée pour expliquer la faible abondance d'olivine sur la surface des roches et dans les sols par rapport à l'intérieur des roches observées dans Gusev. *Bandfield et al., [2011]* observe que, quels que soient les types de processus mis en jeu, ce type de relation qui montre une diminution de la quantité d'olivine en passant de la roche à haute inertie thermique au sol à faible inertie thermique est courante à la surface de Mars (e.g. Nili Fossae, Terrace d'Argyre, sud d'Isidis) et pourrait donc éventuellement impliquer une altération globale de l'ensemble des terrains noachiens. Cependant, nous avons vu que cette corrélation n'était pas toujours aussi claire, en effet certaines plaines enrichies en olivine analysées dans cette étude montrent des signatures d'olivine associées au sable plus fortes que celles associées à la roche dont il est issu. De plus, de par sa période de formation, sa morphologie et sa composition enrichie en olivine déterminée par les analyses in situ, le cratère de Gusev est très semblable aux cratères enrichis en olivine observés dans cette étude. Ces fonds de cratères auraient donc pu subir eu aussi une altération du même type ayant eu pour effet de diminuer leur abondance d'olivine. L'olivine est cependant détectée depuis l'orbite dans ces cratères hespériens mais pas dans les terrains noachiens suggérant que si ces derniers ont en effet été altérés, cette altération ait été plus importante que dans les terrains hespériens. On peut également noter que l'altération observée dans Gusev est superficielle, l'érosion de terrains noachiens ou les impacts devraient donc révéler des signatures d'olivine appartenant au sous-sol supposé enrichi en olivine. Or, on n'observe pas de banc de sable ou de dunes enrichies en olivines comme dans les terrains hespériens et bien que quelques éjectas de cratères enrichis en olivine soient observés dans des terrains noachiens, ceux-ci sont très peu nombreux et ne suggèrent donc pas que ces terrains noachiens aient été dans leur ensemble enrichis en olivine dans le passé [*Loizeau et al., 2012*]. Si la faible abondance en olivine des terrains noachiens est bien due à une altération globale de ces terrains, il est donc nécessaire qu'ils aient été altérés en profondeur afin d'être en accord avec les observations. La faible différence d'âge entre les terrains hespériens datés entre ~3.6 et 3.8 et celles des terrains noachiens datés entre ~3.8 et 4 Ga est cependant trop faible pour expliquer une telle différence dans l'importance et la profondeur de l'altération si on

considère comme seul processus d'altération celui qui a eu lieu dans Gusev. Ceci suggère que si la déficience en olivine des terrains noachiens est bien due à un effet d'altération, cette altération ait été plus importante et plus profonde que celle observée dans Gusev et probablement liée aux conditions environnementales qui ont prévalu durant le Noachien.

Pour finir, on peut remarquer que les grandes plaines volcaniques hespériennes Hesperia Planum et Thaumasia Planum ainsi que la patera Syrtis Major qui sont également reliées au volcanisme hespérien ne montrent pas un enrichissement en olivine similaire aux petites plaines et fonds de cratères hespériens observés dans les terrains de l'hémisphère sud. On peut cependant observer dans ces grands massifs volcaniques de l'olivine associés à des éjectas de cratères comme ce fût déjà mentionné dans la section 4.2.1.1, ainsi qu'à la caldera de Syrtis Major [Poulet et al., 2009a, Mustard et al., 2005, Tornabene et al., 2008]. Ceci suggère que ces plaines et paterae aient pu connaître au début de leur formation un stade de volcanisme enrichi en olivine suivi par des éruptions de laves moins riches en olivine qui les auraient recouvertes comme proposé par Tornabene et al., [2008] dans le cas de Syrtis Major. Ceci est en accord avec une initiation du volcanisme dans ces régions du à du volcanisme fissural qui auraient amené en surface des laves enrichies en olivine provenant directement du manteau. L'observation de chambres magmatiques sous Tyrrhena Patera et Syrtis Major [Kiefer, 2003, 2004 ; section 1.3.3], pourrait expliquerait l'éruption de laves plus évoluées moins riches en olivine par la suite. Les autres massifs volcaniques similaires, tels que Lunae Planum, Solis Planum ou Malea Planum, sont soit recouverts de poussière soit présents à de très faibles latitudes rendant difficile la détermination de leur composition.

4.2.2 Dépôts d'olivine associés aux trois grands bassins d'impacts

4.2.2.1 Contexte géologique

L'analyse globale des dépôts d'olivine détectés avec OMEGA a montré que plusieurs de ces dépôts étaient observés sur la bordure des trois grands bassins d'impacts : Isidis, Argyre et Hellas.

L'olivine autour du bassin d'Isidis est observée dans des contextes géologiques assez particuliers qui ont déjà été analysés par de nombreuses études [Hoefen et al., 2003 ; Hamilton and Christensen, 2005 ; Mustard et al., 2007, 2009 ; Tornabene et al., 2008 ; Poulet et al., 2009a] et ne seront donc que succinctement présentés et analysés dans cette thèse. Ainsi l'olivine sur la bordure du bassin d'Isidis est principalement observée au nord-est, dans la région de Nili Fossae. Cette région s'étend sur plus de 30 000 km² (Figure 79A) et regroupe les plus grands affleurements de roches riches en olivine observées sur Mars avec des signatures très fortes. De l'olivine est aussi détectée sur la bordure ouest et sud d'Isidis à la limite entre la région de Lybia Montes et l'intérieur du bassin (Figure 79B). Cette zone enrichie en olivine montre une forte inertie thermique et une texture rugueuse et consolidée (Figure 79C, D, Bishop et al., 2012) assez similaires à celles observées sur les plaines enrichies en olivines de l'hémisphère sud (section 4.2.1).

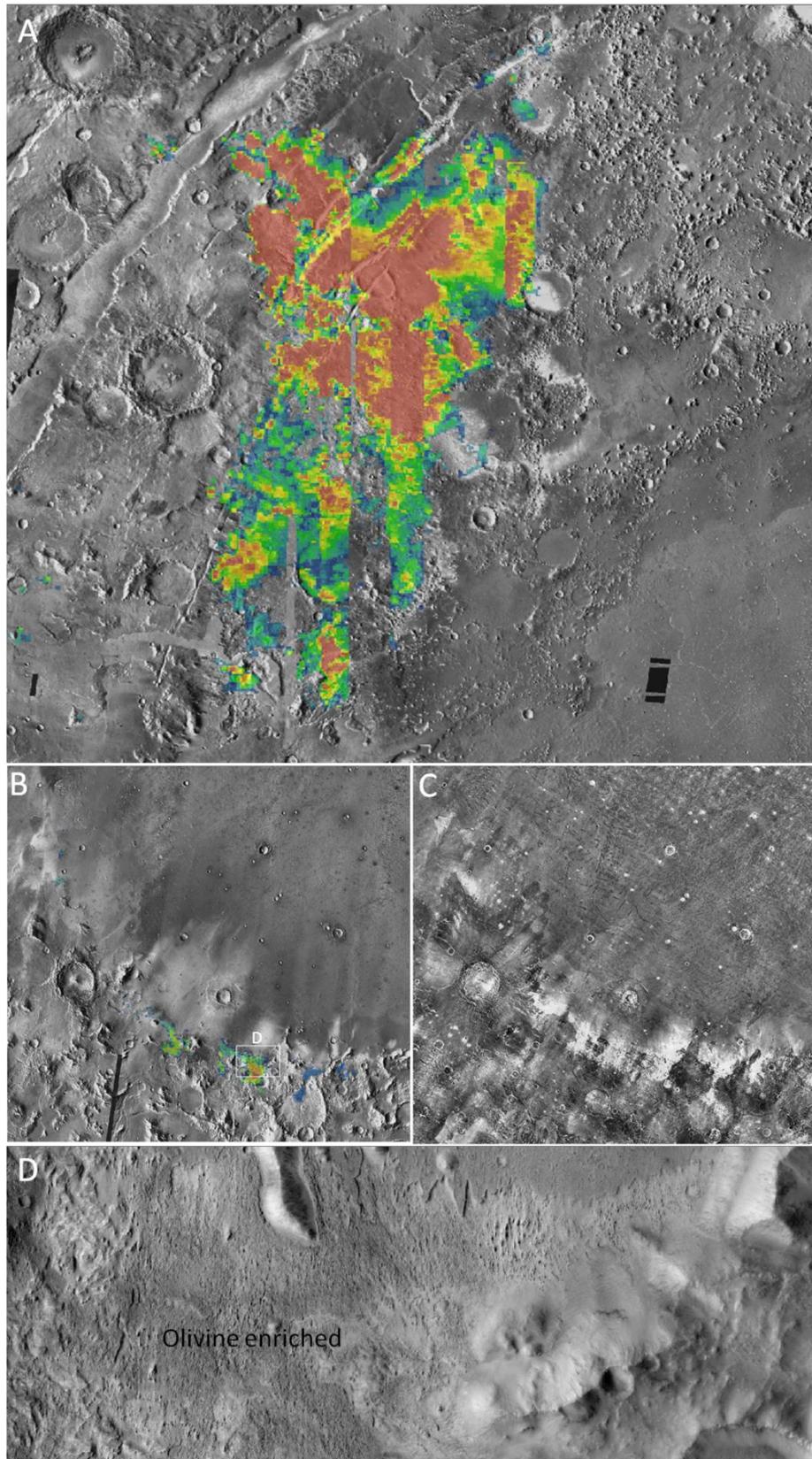


Figure 79. Illustration de la distribution de l'olivine dans la région de Nili Fossae (A) et dans l'ouest et le sud du bassin d'Isidis (B). (C) Mosaïque THEMIS IR de nuit dans la région d'Isidis. (D) Gros plan CTX sur une des zones enrichies en olivine dans le sud d'Isidis montrant une texture rugueuse (zone encadrée en blanc sur la figure B).

Les dépôts d'olivine autour d'Argyre et d'Hellas montrent une distribution et une morphologie très différentes de celles observées autour du bassin d'Isidis. La Figure 80 montre que ces dépôts sont localisés sur la terrasse de ces deux bassins et principalement dans la partie nord bien que quelques détections soient également observées sur la bordure sud d'Argyre. Cette dichotomie entre la terrasse nord et la terrasse sud de ces bassins peut résulter d'une présence importante de glaces et de poussières aux très basses latitudes ainsi qu'à des processus de resurfaçage qui peuvent masquer les signatures d'olivines.

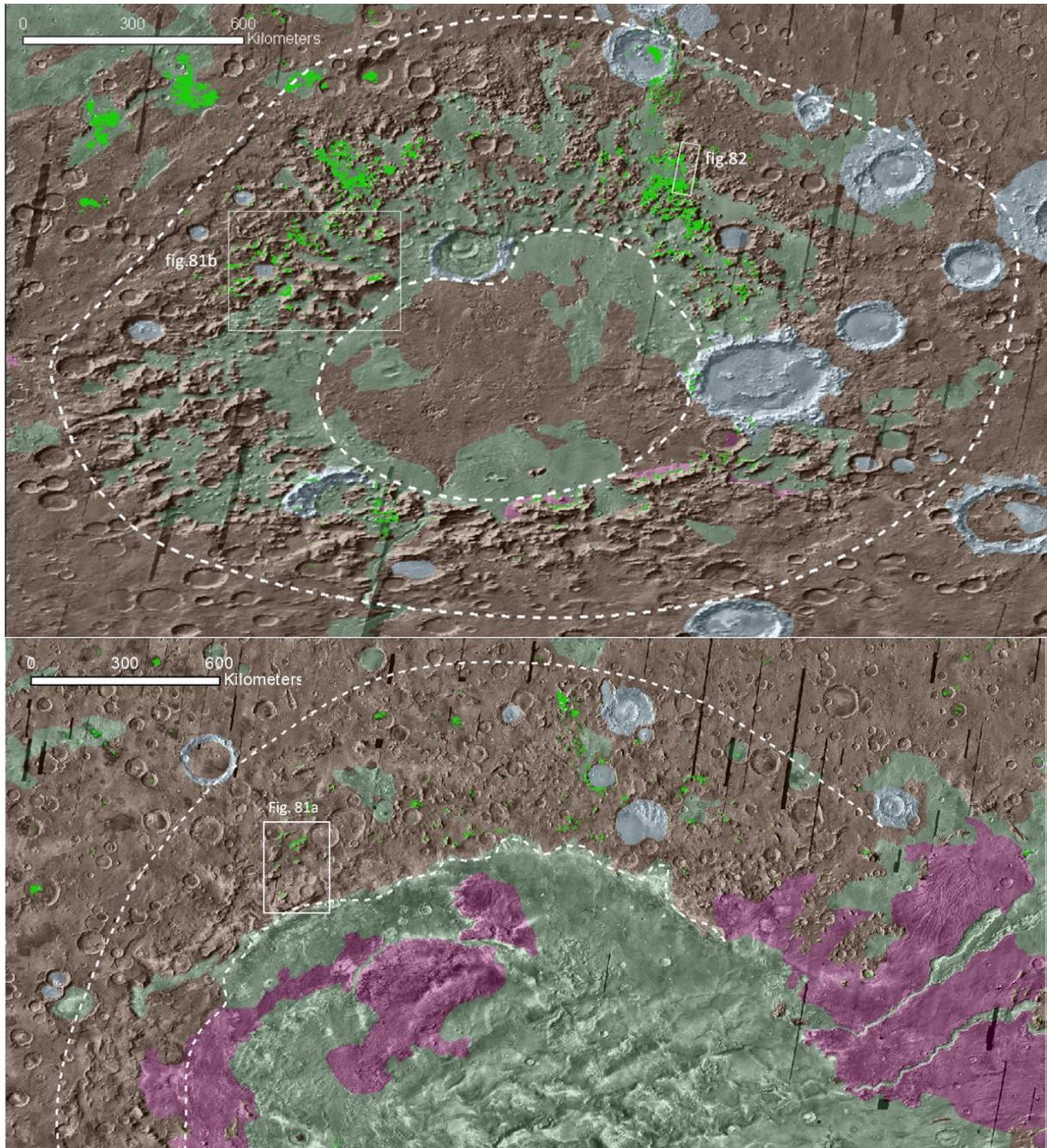


Figure 80. Détections d'olivine (en vert) sur la terrasse d'Argyre (A) et sur la partie nord de la terrasse d'Hellas (B) superposées à la carte géologique USGS avec en marron les unités Noachiennes, en vert les unités hespériennes et en gris les unités associées à du matériau associé aux impacts. Les lignes pointillées blanches délimitent approximativement les limites des terrasses des deux bassins.

Au niveau de la terrasse d'Argyre, les dépôts d'olivines sont clairement associés à des sortes de petites buttes plus ou moins isolées et dispersées un peu partout sur la terrasse du bassin. Ces buttes sont associées à une unité Noachienne « Nplh » définie comme étant une surface vallonnée et formée de débris d'impact (Figure 80A et Figure 81B, *Skinner et al., 2006*). La Figure 81C montre que les signatures d'olivines sont très bien corrélées aux zones de ces buttes montrant les températures THEMIS de nuit les plus élevées. Ceci est en accord avec l'image CTX (Figure 81D) qui montre que ces régions enrichies en olivines sont associées à une surface rocheuse érodée et visible en certains endroits au travers d'une couche plus ou moins importante de sable ou de particules plus fines. Cette couche de sable peut masquer en partie les signatures d'olivine de la surface rocheuse et explique la faible inertie thermique et les faibles signatures d'olivine observables en certains endroits. *Bandfield and Rogers [2008]* a mesuré une inertie thermique maximale de 550 tiu pour ces buttes, ce qui est en accord avec la présence d'une quantité significative d'affleurements rocheux. Ces buttes enrichies en olivine sont entourées de plaines hespériennes d'unité Hpl3 qui montrent également des signatures d'olivine. Ces plaines pourraient donc être reliées aux plaines hespériennes enrichies en olivine détectées dans tous les terrains de l'hémisphère sud (section 4.2.1). Cependant, on ne peut pas exclure ici que ces signatures d'olivine soient associées à du matériau érodé des buttes enrichies en olivine et transporté sur ces plaines hespériennes [*Bandfield and Rogers, 2008*].

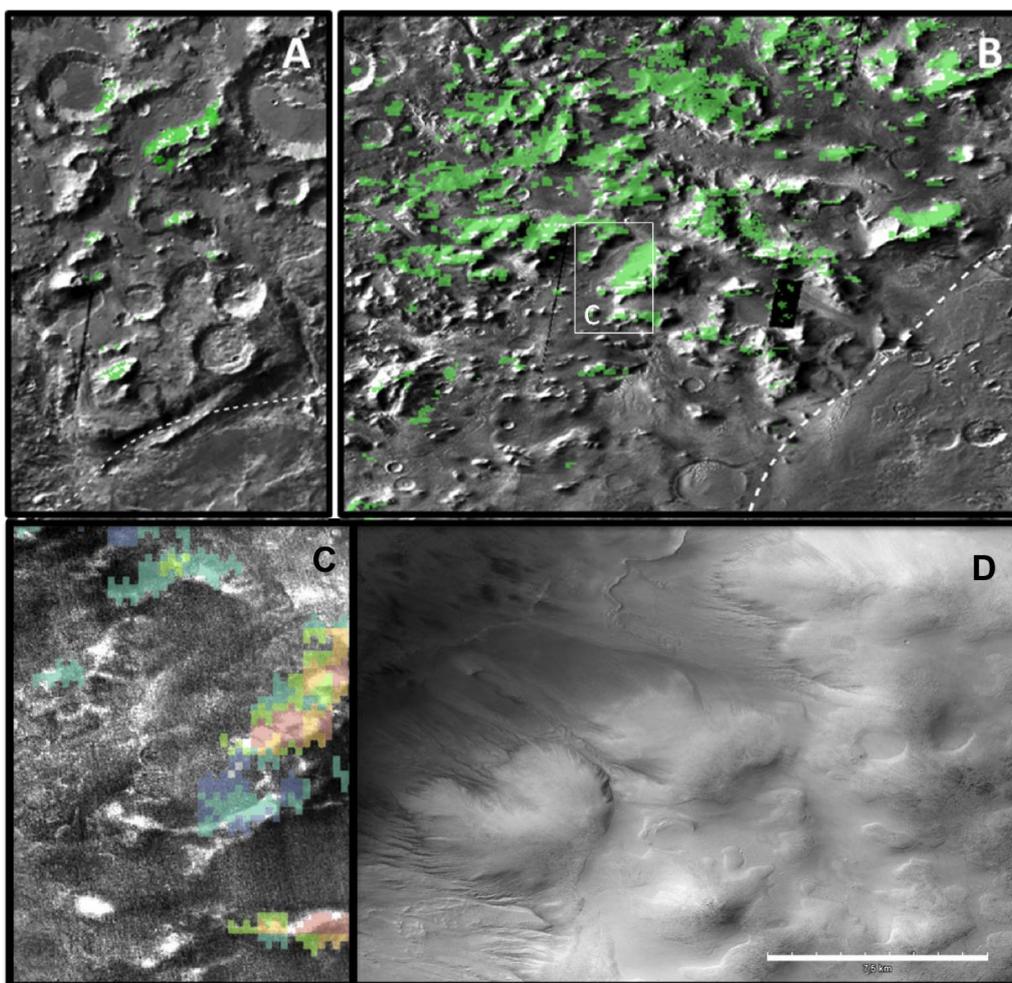


Figure 81. Détections d'olivine (en vert) observées sur les terrasses d'Hellas (A) et d'Argyre (B) et superposées à la mosaïque THEMIS IR de jour. (C) Image THEMIS IR de nuit de la zone encadrée en blanc sur la figure (B) avec l'olivine cartographiée du bleu jusqu'au rouge (critère OSP2).

La distribution des détections d'olivine autour du bassin d'Hellas n'est pas aussi claire que celle autour d'Argyre. En effet, ces détections sont moins nombreuses et montrent des signatures d'olivine souvent à la limite de détection. Cette distribution plus complexe peut s'expliquer par l'intense resurfaçage que cette région a subi et qui a pu affecter de façon importante sa morphologie ainsi que sa composition, ainsi que par la présence de poussière. Néanmoins, on retrouve sur la terrasse d'Hellas des détections d'olivines associées aux mêmes structures en forme de buttes que celles observées sur la terrasse d'Argyre (Figure 81A). Ces buttes sont également principalement associées à une unité Noachienne « Nh1 » définie comme étant la bordure du bassin d'Hellas.

Certaines des détections d'olivine autour des deux bassins Hellas et Argyre ont déjà été reportées par des études basées sur les données TES et THEMIS [Koeppen and Hamilton, 2008 ; Bandfield and Rogers, 2008 ; Lane and Goodrich, 2010 ; section 1.2.2.3]. La Figure 82 compare les détections d'olivine issues d'une observation THEMIS IR (cartographiées en violet) et celles issues d'une observation OMEGA (cartographiées en vert) pour une même région localisée au nord-est de la terrasse d'Argyre. On peut observer que ces détections sont en parfaite corrélation et confirment la localisation de l'olivine sur de petites buttes entourées de plaines sans signature d'olivine.

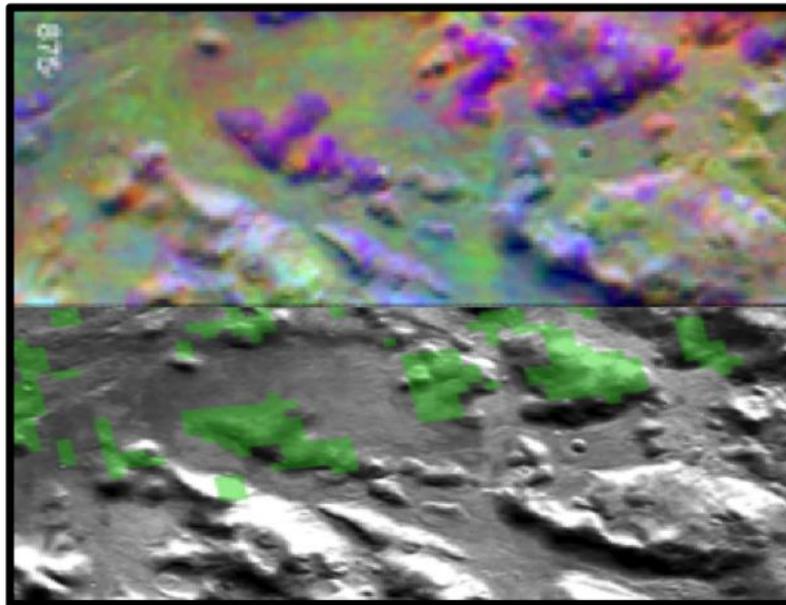


Figure 82. Comparaison entre les observations THEMIS IR et OMEGA pour une même région localisée au nord-est de la terrasse d'Argyre. (haut) Observation THEMIS SDC scène I08016003, l'olivine apparaît en violet [Lane and Goodrich, 2010]. (bas) Observation OMEGA avec les détections d'olivine en vert superposées sur la mosaïque THEMIS de jour.

4.2.2.2 Période de formation

Ces dépôts d'olivine étant associés à des petites buttes de faibles étendues spatiales, la datation par la méthode des comptages de cratères n'est pas applicable sur ces petites unités. Nous considérerons donc ici que ces dépôts d'olivine ont l'âge des unités dans lesquelles ils sont contenus (Nplh et Nh1) i.e. Noachien.

4.2.2.3 Composition

En se basant sur les valeurs des critères spectraux, ces détections d'olivine autour des bassins d'Hellas, Argyre et Isidis ont plutôt une composition de type 2 (section 3.5.4).

Les détections d'olivine dans la région de Nili Fossae montrent des signatures très importantes en accord avec une olivine très riche en fer et/ou avec des gros grains. *Poulet et al.*, [2009b] a montré que l'olivine observée dans cette région présentait une teneur en fer intermédiaire avec un rapport $Mg/Mg+Fe \sim 0.5$, une taille de grain de plusieurs millimètres et une abondance d'environ 40 %.

Les détections autour des bassins d'Hellas et d'Argyre montrent des signatures moins importantes que dans Nili Fossae en accord avec une composition plutôt intermédiaire en termes de teneur en fer et/ou taille de grain et/ou abondance (voir rapport de spectre annexe 1). Nous avons décidé d'utiliser le modèle de transfert radiatif (section 2.3) afin d'avoir des contraintes plus précises sur la composition de l'olivine dans ces régions. Cette analyse est basée sur 12 spectres extraits des terrasses d'Argyre et d'Hellas sur lesquels ont été testés les trois mélanges initiaux présentés dans la section 4.1.2. Les abondances issues de ces modélisations montrent une abondance moyenne de 12 et 27 % d'olivine mélangée avec ~30 % de pyroxène et ~40-50% de plagioclase. Les meilleurs ajustements ont été obtenus avec le troisième mélange qui fait intervenir les deux types d'olivine, fayalite et forsterite, avec une taille de grain fixée à 100 μ m. L'abondance obtenue pour la forsterite étant cependant toujours plus élevée que celle obtenue pour la fayalite indiquant un rapport $Mg/Mg+Fe$ supérieur à 1 ($Fo > 50$). Des ajustements satisfaisants ont également été obtenus en utilisant uniquement la forsterite (premier mélange), mais avec une taille de grains $> 100\mu$ m. Bien qu'il soit délicat de déduire une composition exacte de l'olivine à partir de sa bande d'absorption à 1 μ m, il semblerait que les critères spectraux ainsi que les modélisations de transfert radiatif soient tous les deux en faveur d'une composition intermédiaire ou légèrement enrichie en magnésium (mais avec des gros grains). Cette composition semble cependant être moins riche en magnésium que celle obtenue avec les données TES qui détectent de l'olivine avec des compositions allant jusqu'à Fo90 dans ces régions [*Koepfen and Hamilton, 2008 ; Lane and Gooldrich, 2010*].

4.2.2.4 Origine et implications

Les contextes très particuliers dans lesquels est observée l'olivine dans la région de Nili Fossae ainsi que dans le sud du bassin d'Isidis en comparaison de ceux observés autour des deux autres grands bassins Argyre et Hellas suggèrent des origines différentes. Trois grandes hypothèses ont été proposées pour expliquer la formation de ces dépôts d'olivine, chacune plaçant leurs formations à une époque différente par rapport à la formation du bassin d'Isidis. La première hypothèse propose que ces dépôts se soient formés à partir d'une couche intrusive riche en olivine présente sous la surface avant l'impact et ayant été mise à jour par ce dernier et la tectonique qui lui est associée [*Hoefen et al., 2003 ; Hamilton and Christensen, 2005*]. La deuxième hypothèse proposée par *Mustard et al.*, [2007] se base sur la stratigraphie de la région de Nili Fossae qui montre que le dépôt d'olivine est placé au-dessus d'un dépôt de phyllosilicates. *Mustard et al.*, [2007] propose alors que ces dépôts d'olivine se soient formés pendant l'impact et représentent de la roche fondue puis recristallisée. En se basant sur l'étude du dépôt d'olivine sur la bordure sud d'Isidis, *Tornabene et al.*, [2008] propose comme troisième hypothèse que ces dépôts se soient formés après l'impact par remplissage du bassin d'Isidis par des laves enrichies en olivine provenant de Syrtis Major, Tyrrhena Patera ou de failles présentes sous le bassin. Ces laves enrichies en olivine auraient par la suite été recouvertes par d'autres coulées de laves moins riches en olivine.

L'étude des nombreux dépôts d'olivine observés dans les terrains de l'hémisphère sud ayant fait du volcanisme fissural une des principales sources de matériau enrichi en olivine dans ces régions, nous considérerons dans cette thèse qu'une formation après l'impact par l'éruption de laves enrichies en olivine provenant de fractures sous le bassin d'Isidis (ou éventuellement

des premiers stades de volcanisme dans Syrtis Major, *Tornabene et al.*, [2008]) est le processus de formation le plus en accord avec nos observations, au moins pour le dépôt d'olivine dans le sud d'Isidis. Cette hypothèse est appuyée par la texture du matériau enrichie en olivine dans cette région qui est très similaire à celle observée dans les plaines et les fonds de cratères hespériens résultant du volcanisme fissural dans l'hémisphère sud. Cependant, les fortes signatures d'olivine observées dans la région de Nili Fossae, résultant de la taille millimétrique des grains d'olivine et de son abondance importante (~40 %), sont uniques sur Mars et diffèrent significativement des signatures observées dans les dépôts hespériens de l'hémisphère sud. Comme cela a déjà été discuté dans *Poulet et al.*, [2009a], ces mégacristsaux d'olivine sont plus en accord avec une cristallisation en profondeur. Les roches volcaniques extrusives n'étant en général que la partie émergée des dépôts, il est possible que le dépôt de Nili Fossae représente la contrepartie intrusive du volcanisme ayant formé le dépôt observé sur la bordure sud. Cependant il est également possible que ces deux dépôts aient des origines totalement décorréliées du fait de leur possible différence d'âge.

Les détections d'olivine autour des bassins Hellas et Argyre prennent la forme de petites tâches discontinues dispersées sur la partie nord de leurs terrasses. Ces détections sont associées à des petites buttes plus ou moins isolées et associées aux unités Nplh et Npl1 qui sont parmi les plus anciennes de la surface de Mars (début à milieu Noachien) et déposées lors de l'impact. Cette distribution particulière ainsi que l'âge et la définition des unités auxquelles elles sont associées suggère fortement que ces buttes enrichies en olivine se soient formées pendant l'impact. Des simulations numériques ont montré que certains impacts pouvaient être assez importants pour excaver la croûte lunaire ainsi qu'une partie du manteau supérieur [*Stewart 2011*]. Les éjectas de croûte fondue et de manteau supérieur formeraient alors des petits « patches » dispersés sur la terrasse du bassin (Figure 83) dont la distribution serait très similaire à celle des détections d'olivine observées autour d'Argyre et d'Hellas. Bien que ces résultats étaient à l'origine obtenus pour les bassins lunaires, *Stewart [2011]* a montré qu'ils pouvaient être extrapolés aux bassins géants martiens, suggérant que les buttes enrichies en olivine des terrasses des bassins Argyre et Hellas soient formées de matériau excavé de manteau supérieur et de la croûte inférieure pendant l'impact.

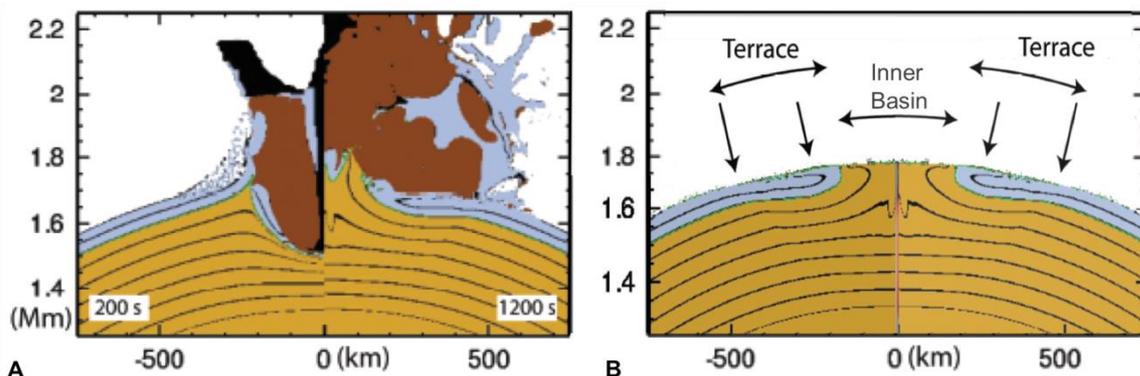


Figure 83. Simulation de l'impact ayant formé le bassin Oriental sur la Lune (projectile de 100 km arrivant à une vitesse de 10.6 km/s sur une croûte de 60 km d'épaisseur). (A) Instantanée à 200 sec et 1200 sec après l'impact montrant la profondeur de la cavité transitoire et le soulèvement maximal du manteau (marron : manteau, bleu : croûte, marron foncé : projectiles, vert : mélange de croûte fondue et de manteau). (B) Stratigraphie finale du bassin après l'impact. Les éjectas de croûte fondue et de manteau, représentés en vert, sont dispersés sous la forme de petites tâches sur la terrasse du bassin (issue de *Stewart [2011]*).

Dans cette hypothèse, l'enrichissement en olivine de ces buttes refléterait la composition du manteau supérieur. Ceci est en accord avec la composition générale du manteau obtenue à

partir des météorites martiennes [Wanke and Dreibus, 1985 ; Bertka and Fei, 1998a ; Elkins-Tanton et al., 2003, 2005a] qui prévoit qu'il soit riche en olivine (section 1.3.2). La composition exacte de ce manteau supérieur dépend de la façon dont il a cristallisé. Si on considère qu'il a cristallisé à partir d'un océan de magma, la composition de l'olivine dans la partie supérieure de manteau devrait être riche en fer dans le cas d'une cristallisation sans overturn et riche en magnésium dans le cas d'une cristallisation avec overturn [Elkins-Tanton et al., 2003, 2005a ; voir section 1.3.2]. La composition plutôt enrichie en magnésium de l'olivine observée sur les buttes autour des bassins d'Argyre et d'Hellas, interprétées comme étant du matériau mantellique, est donc plus en accord avec une cristallisation suivie d'un overturn. L'abondance de cette olivine, calculée entre 12 et 27 %, est cependant beaucoup plus faible que celle prédite par les modèles qui est de ~ 60 % [Elkins-Tanton, 2005a]. Ceci peut s'expliquer par le fait que ces buttes ne sont probablement pas formées que de matériau mantellique, mais d'un mélange avec du matériau provenant de la croûte inférieure qui a pu diminuer l'abondance totale de l'olivine.

4.2.3 Les dépôts d'olivine dans les plaines du nord

4.2.3.1 Contexte

Dans les plaines du nord, les conditions atmosphériques variables combinées à la présence de poussières et de glaces saisonnières peuvent masquer en partie les signatures des minéraux présents à la surface et rendre plus difficiles leur détection, leur identification et leur cartographie. Nous avons vu dans la section 3.5.3, que ces régions présentent des spectres très bleus dans le proche infrarouge avec une bande à $2\mu\text{m}$ très faible et une bande à $1\mu\text{m}$ presque inexistante suggérant la présence de pyroxène en petite quantité probablement recouvert d'un vernis d'oxydes de fer [Poulet et al., 2007]. Une inspection plus précise des régions montrant des détections d'olivine (principalement détectées avec le critère OSP3 qui est moins sensible à cette pente bleue) a révélé que leurs spectres montraient une pente moins pentue particulièrement entre 1.0 et $1.6-1.7\mu\text{m}$ signe d'une absorption dans cet intervalle de longueur d'onde que nous avons interprétée comme étant due à la présence d'olivine (Figure 84). Des rapports de spectres issus de ces régions sont présentés en annexe 1 pour chaque dépôt discuté dans la suite.

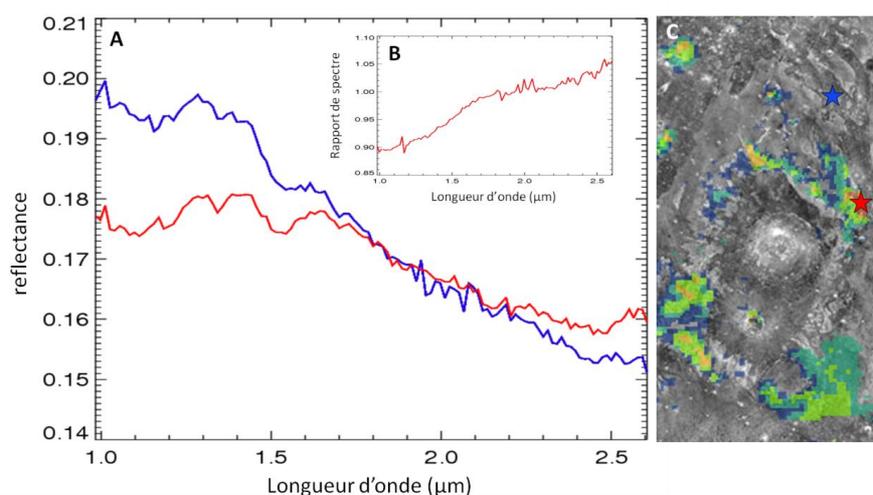


Figure 84. Exemple de spectre observé dans les plaines du nord. Ici le spectre rouge en (A) est extrait d'un plateau enrichi en olivine observé dans la région de Chryse Planitia et indiqué avec une étoile rouge sur la figure (C). Le rapport de spectre montré en (B) est obtenu en divisant le spectre rouge par le spectre bleu qui est issu d'une région pauvre en olivine (étoile bleue en (C)) et est typique des spectres à forte pente observés dans les plaines du nord.

Les dépôts d'olivine détectés dans les plaines du nord et particulièrement dans les régions de Chryse Planitia, Acidalia Planitia et Utopia Planitia, sont répartis selon trois contextes géologiques différents : des éjectas de cratères de tailles variées ; des dunes et des bancs de sable sombre accumulés au fond de grands cratères ; des affleurements rocheux très étendus (Figure 85).

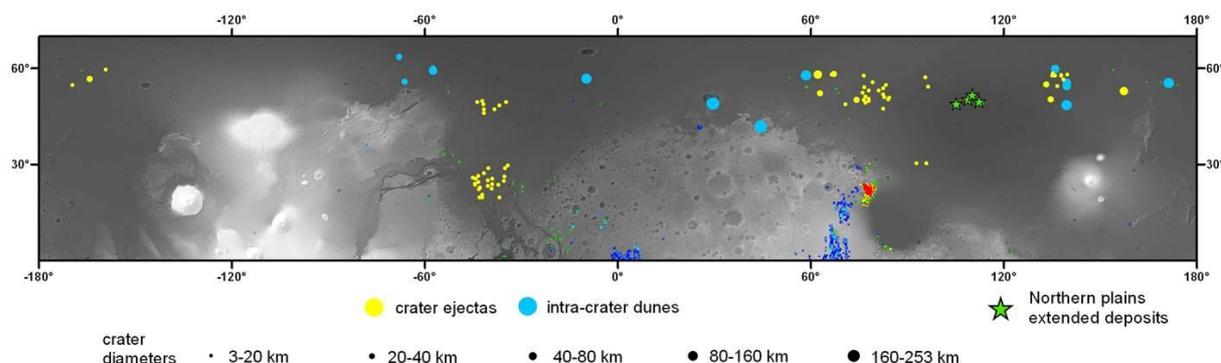


Figure 85. Détections d'olivine dans les plaines du nord superposées à la carte d'altimétrie MOLA avec la localisation des principaux contextes observés : éjectas de cratères, dunes et bancs de sable dans le fond des cratères, dépôts étendus dans la région d'Utopia Planitia. Les symboles ronds qui représentent les dépôts associés aux cratères ont un diamètre qui dépend du diamètre de cratère. À noter que certains gros cratères présentant des dunes ou bancs de sable enrichis en olivine dans leur fonds (indiqués avec un rond bleu) montrent également des signatures d'olivine dans leurs éjectas.

La Figure 86 est centrée dans la région de Chryse Planitia. Cette région est une des régions les moins poussiéreuses des plaines du nord et il est donc plus facile d'accéder à sa minéralogie mafique. Les signatures d'olivine observées sur cette figure sont principalement associées à des éjectas de cratères au diamètre relativement faible de 3-10km pour la plupart. Ces éjectas de cratères enrichis en olivine montrent une température THEMIS de nuit élevée et de jour faible indiquant une surface plus rocheuse et/ou moins poussiéreuse que la surface juxtaposée. À l'inverse, les éjectas de cratères qui ne montrent pas de signatures d'olivine montrent des températures THEMIS de nuit faibles et de jour élevées similaires aux terrains environnants pauvres en olivine. Ceci pourrait résulter de la présence de poussières sur ces éjectas expliquant en même temps l'absence de signatures d'olivine. La taille relativement faible de ces cratères suggère que la couche d'olivine qu'ils excavent se situe relativement proche de la surface. La Figure 86B montre des signatures d'olivine associées à un double éjecta lobé formé autour d'un cratère de plus gros diamètre d'environ 20 km. Cette olivine est cependant localisée sur le lobe extérieur de cet éjecta (le plus éloigné du cratère), le lobe intérieur ne montrant pas de signature d'olivine. Cette formation particulière permet de sonder la stratigraphie de la surface sous-jacente qui semble donc formée d'une couche enrichie en olivine proche de la surface superposée à une couche pauvre en olivine (section 1.3.4).

Dans la partie la plus à l'est de cette zone, l'olivine est également observée associée à un dépôt assez large centré en -34.6°E et 22°N et recouvert par des éjectas de cratères. [Edwards and Christensen, 2011] reporte pour ce dépôt une inertie thermique de ~ 820 tiu en accord avec un substrat rocheux en partie exposé. Cette interprétation est en accord avec les images CTX qui montrent une sorte de plateau d'albédo clair qui semble avoir été mis à jour après l'érosion de la surface environnante, ceci suggérant une consistance plus résistante pour ce plateau qui a mieux résisté à l'érosion (Figure 86C). Cette unité pourrait donc représenter l'affleurement d'une couche enrichie en olivine plus étendue présente dans cette région et peut être connectée à la couche mise à jour par les éjectas de cratères observés à $\sim 100\text{m}$ à l'ouest.

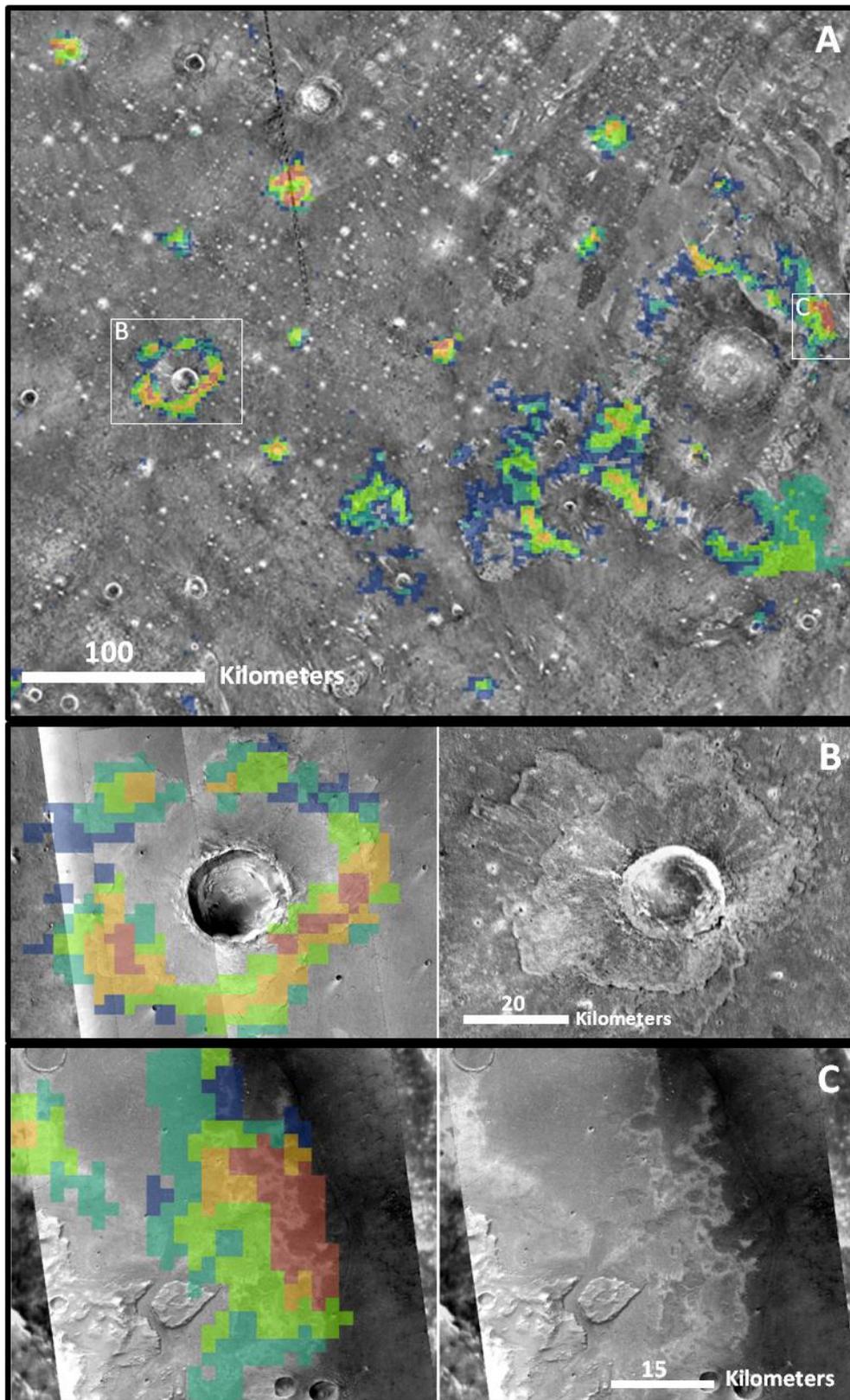


Figure 86. (A) Detections d'olivine dans la région de Chryse Planitia [-37.5°E, 23.9°N] superposées à la mosaïque THEMIS IR de nuit. (B) Gros plan sur un double éjecta lobé : (gauche) detections d'olivine sur une mosaïque CTX, (droite) même zone avec la mosaïque THEMIS IR de nuit. (C) Gros plan sur une zone du plateau enrichi en olivine : (gauche) detections d'olivine sur une mosaïque CTX, (droite) mosaïque CTX seule.

Bien qu'ambigües à cause de la présence de poussière et des spectres très pentus de ces régions, de faibles signatures spectrales (à la limite de la détection) interprétées dans cette étude comme résultant de la présence d'olivine, ont été détectées dans des éjectas lobés de petits cratères (<20kms) dans Acidalia Planitia ainsi que dans la région de faible albédo située au nord-ouest d'Utopia Planitia (Figure 85 et Figure 87). Ces signatures suggèrent que ces régions présentent également une couche de composition basaltique enrichie en olivine juste sous la surface.

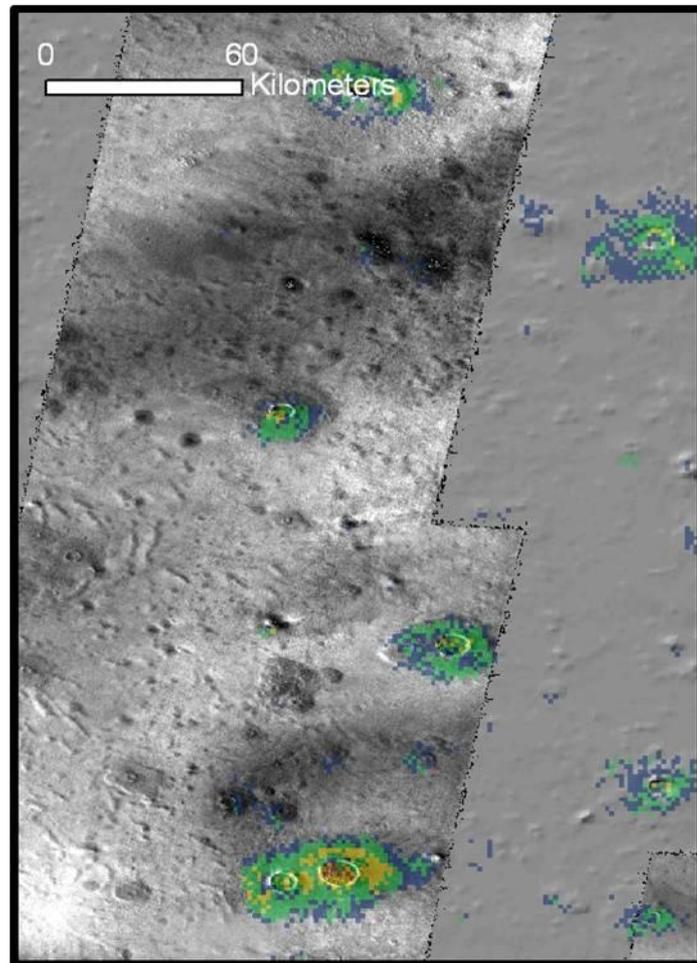


Figure 87. Détections d'olivine associée à des éjectas de petits cratères (<20km) dans l'ouest d'Utopia Planitia [76°E, 52.6°N] superposées à la mosaïque THEMIS IR de jour.

De l'olivine a également été détectée dans des éjectas de cratères de grand diamètre [$>20\text{km}$] présents aux hautes latitudes (Figure 85 et Figure 88). L'image HiRISE présentée sur la Figure 88B illustre une zone enrichie en olivine d'un de ces éjectas qui montre des motifs allongés habituellement associés à des éjectas lobés fluides bien conservés [Mangold et al., 2007]. Étant donné la taille importante de ces cratères, l'olivine excavée par ces impacts peut cependant provenir d'une couche bien plus profonde que celle excavée par les petits cratères dans les régions de Chryse Planitia, Acidalia et Utopia Planitia, très certainement de la croûte primitive ou des laves noachiennes. À ces hautes latitudes, certains grands cratères montrent également de l'olivine associée à des dunes et des bancs de sable sombre accumulés sur leur fond (Figure 89). L'image CTX illustrée sur la Figure 89B montre que ces dunes semblent provenir d'un affleurement rocheux probablement associé au pic central de ce cratère. On peut noter que ce type de cratère a également été observé par CRISM [Carter et al., 2010].

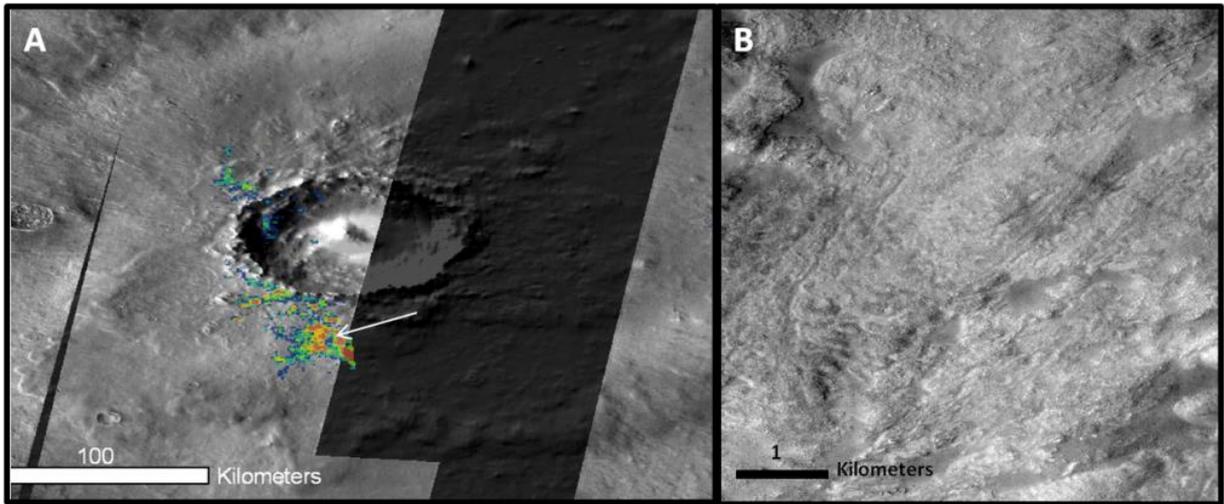


Figure 88. (A) Détections d'olivine associées à un éjecta de grand cratère situé à [58.5°E, 58°N] superposées à la mosaïque THEMIS IR de jour. (B) Zoom HiRISE montrant une zone d'éjecta lobé fluide (indiqué par une flèche blanche sur la figure (A)).

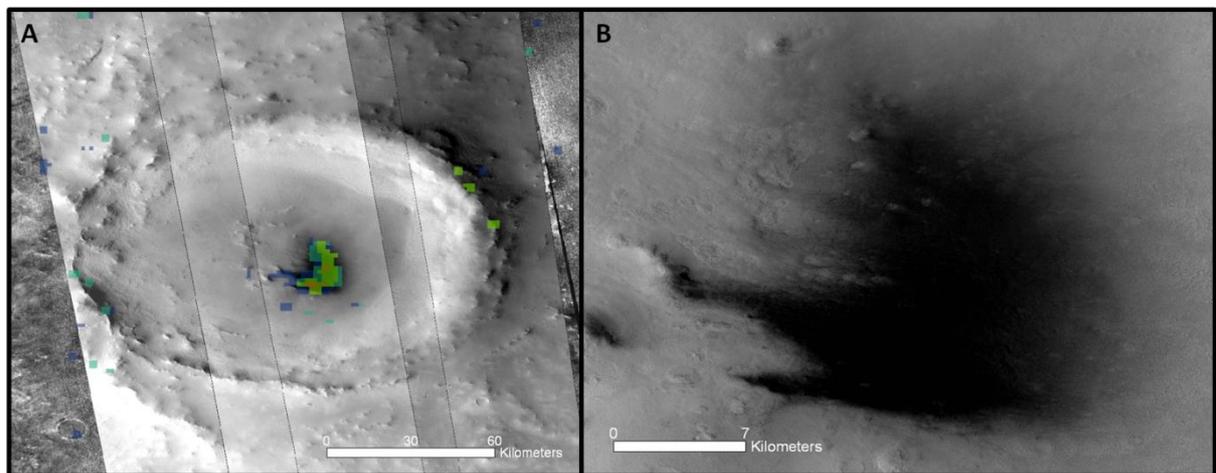


Figure 89. (A) Détections d'olivine associées à un banc de sable accumulé dans le fond d'un grand cratère (~100km) localisé en [139.7°E, 48°N] et superposées à une mosaïque CTX. (B) Gros plan CTX sur le banc de sable enrichi en olivine. On peut observer que le sable sombre semble provenir d'un affleurement localisé au centre du cratère et probablement associé à son pic central.

Un dépôt d'olivine au contexte unique est observé dans la région de faible albédo d'Utopia Planitia (Figure 85 et Figure 90). Ce dépôt s'étend sur plus de 500 km et montre des propriétés distinctes de la surface environnante : plus forte température THEMIS de nuit associée à un faible albédo et à une texture rugueuse et criblée de trous similaire à celle observée dans les dépôts de l'hémisphère sud et typique des laves érodées (Figure 90C et D). À l'inverse, la surface environnante pauvre en olivine montre une faible température THEMIS de nuit, un albédo élevé et une texture plutôt lisse suggérant qu'elle soit formée ou recouverte de particules plus fines ou de poussières. Ces particules ou poussières semblent également être présentes dans les dépressions observables sur le dépôt sombre enrichi en olivine. Ces observations suggèrent que la surface peu consolidée d'albédo élevé ait été en partie érodée pour laisser apparaître les laves enrichies en olivine d'albédo sombre sous-jacentes.

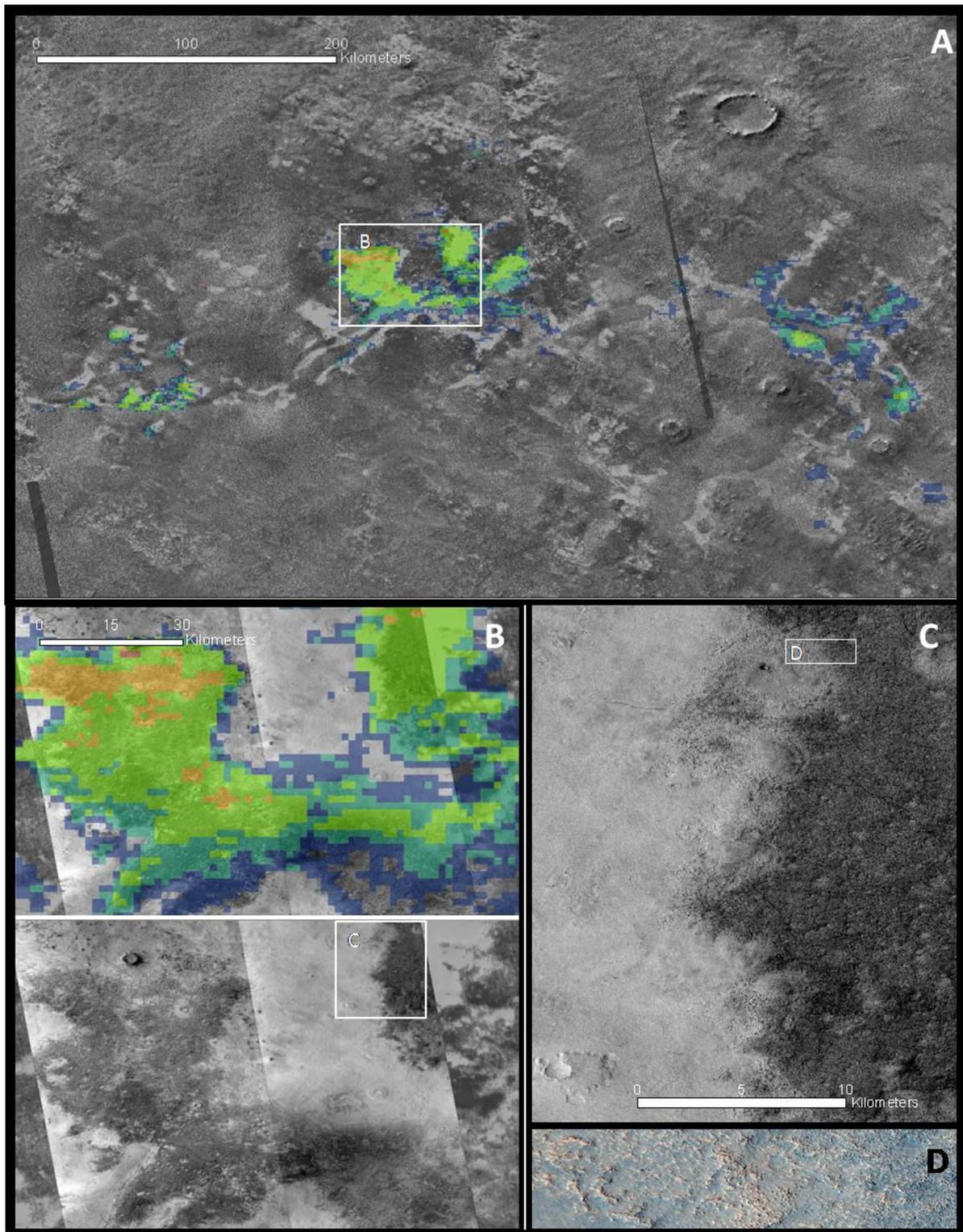


Figure 90. (A) Detections d'olivine associées au dépôt étendu présent dans la région d'Utopia Planitia [110.8°E ; 49.3°N] superposées à la mosaïque THEMIS de nuit. (B) Gros plan sur une partie de ce dépôt (encadré en blanc sur la figure (A)) avec les detections d'olivine (haut) superposées à une mosaïque CTX (bas). (C) Gros plan CTX sur la transition entre les terrains enrichis en olivine de faible albédo et les terrains pauvres en olivine d'albédo élevé.

4.2.3.2 Période de formation

L'âge des couches enrichies en olivine excavées par les impacts ne peut être déterminé ni grâce à la carte géologique USGS, ni par une méthode de comptage de cratère. Une estimation de leur âge peut néanmoins se faire de manière relative : plus le cratère est gros, plus la couche excavée est profonde et plus le matériau est a priori ancien. Les régions dans lesquelles sont détectés ces cratères étant principalement hespériennes, nous considérerons que les petits cratères (< 20 km) excavent du matériau hespérien, les gros cratères (>20kms) du matériau noachien enfoui (voir après).

Le dépôt étendu d'olivine observé dans Utopia Planitia est localisé à la limite entre une unité géologique amazonienne associée à la région volcanique d'Elysium (Ael3) et une unité géologique hespérienne associée à la formation de Vastitas Borealis (Hvm, Hvg) rendant l'estimation de sa période de formation difficile à déterminer. On peut cependant noter ici que l'unité amazonienne Ael3 est considérée par *Werner et al.*, [2009] comme étant la dernière grande effusion de laves dans la région d'Elysium datée entre 3.3 et 3.4 Ga (voir section 1.3.3.2)

4.2.3.3 Composition

Les conditions difficiles présentes dans les plaines du nord altèrent considérablement les spectres issus de ces régions compliquant leur analyse spectrale et plus encore l'application du modèle de transfert radiatif. Ce modèle ne sera donc pas appliqué dans cette section pour déterminer la composition et l'abondance de l'olivine observée dans les dépôts. Cependant, les rapports de spectres présentés en annexe montrent pour la plupart des dépôts présentent des signatures larges avec une aile droite proche de $1.7\mu\text{m}$ plus en accord avec une olivine de type 2 i.e. enrichie en fer et/ou avec des gros grains.

4.2.3.4 Origines et implications

Les plaines du nord montrent une géologie complexe et encore mal contrainte. Elles sont formées d'un socle noachien et semblent avoir été ressuffacées et modifiées par du volcanisme, des dépôts sédimentaires et des processus géologiques secondaires, ainsi que par les effets des variations climatiques, durant les périodes hespériennes et amazoniennes. Les proportions de chacun de ces processus de resurfacages sont cependant encore débattues.

L'olivine associée à des petits éjectas dans la région de Chryse Planitia pourrait provenir d'une couche sous-jacente enrichie en olivine dans cette région. Étant donné la taille des cratères, de 3-10 km pour la plupart, cette couche est proche de la surface. Ceci est soutenu par la présence d'un double éjecta associé au cratère de plus gros diamètre (~20kms) observé dans la même région et qui montre de l'olivine uniquement sur l'éjecta externe, suggérant que la couche d'olivine ne soit profonde que de quelques centaines de mètres. La présence de cette couche est appuyée par le plateau enrichi en olivine observé à ~100m à l'est de ces éjectas et qui pourrait représenter un affleurement de cette couche mis à jour par l'érosion. Ces observations, ainsi que celles des petits éjectas de cratères enrichis en olivine dans le nord d'Acidalia Planitia, sont en accord avec les observations de *Salvatore et al.*, [2010] faites avec CRISM qui reportent des signatures d'olivine dans les éjectas, les murs et les pic centraux de nombreux cratères dans les régions d'Acidalia et de Chryse Planitia. *Salvatore et al.*, [2010] conclut que ces détections résultent de la présence d'une unité basaltique juste sous la surface dans ces régions, recouverte par une couche d'altération et/ou de sédiments. Bien que les signatures soient proches de la limite de la détection, l'olivine détectée dans les éjectas de petits cratères (<20 km) au nord-ouest d'Utopia Planitia suggère que la couche enrichie en olivine observée dans Chryse et

Acidalia Planitia pourrait s'étendre bien plus loin dans les plaines du nord. Ceci est en accord avec un remplissage de la quasi-totalité des plaines du nord par des laves durant le début de l'époque hespérienne comme cela a été proposé par *Head et al.*, [2002]. La composition enrichie en olivine de ces laves, mise en évidence dans cette étude, renforce la relation déjà proposée dans la section 4.2.1 entre le remplissage des plaines du nord et la formation à la même époque des plaines et fonds de cratères enrichis en olivine observés dans les terrains de l'hémisphère sud. Ceci est en faveur d'un événement de volcanisme fissural enrichi en olivine à l'échelle planétaire au début de l'Hespérien.

Ces nouveaux indices en faveur d'un remplissage des plaines du nord par des laves soutiennent l'hypothèse que le pyroxène observé dans les régions sombres de l'hémisphère nord puisse avoir une origine associée à du volcanisme local i.e la même que celle de l'olivine.

La petite taille de certains de ces cratères (<10 km), indiquant la présence de cette couche enrichie en olivine juste sous la surface, suggère de plus que cette couche de sédiments basaltiques soit peu épaisse au moins dans ces régions, ce qui est en accord avec les estimations de *Head et al.*, [2002] et de *Catling et al.*, [2011 ; 2012] qui déterminent l'épaisseur de cette couche à moins de ~100 m.

Les dunes ainsi que les éjectas enrichis en olivine en association avec les larges cratères (>20 km) présents aux hautes latitudes dans la région de Vastitas Boréalis, ont pour certains déjà été observés par des études antérieures [*Rogers and Christensen, 2003 ; Bibring et al., 2005*]. On ne peut pas totalement exclure ici que les dunes proviennent de matériau issu des terrains enrichis en olivine dans les terrains de l'hémisphère sud, cependant les grandes distances qui séparent ces cratères des régions basaltiques les plus proches rendent ce scénario peu probable dans les conditions atmosphériques actuelles [*Rogers and Christensen, 2003*]. De plus, le fait que l'on n'observe pas de matériau de composition similaire sur la surface présente entre ces cratères et les moyennes latitudes, ou aux environs proches des cratères [*Tirsch et al., 2011*], renforce le fait que ces dunes sont principalement formées de matériau provenant de l'intérieur du cratère. *Head et al.*, [2002] estime à ~900 m l'épaisseur des laves qui ont rempli les plaines du nord et à ~100 m celle de la couche de sédiment qui les recouvre ce qui fait une épaisseur d'environ 1 km sur la croûte Noachienne. Ces cratères de diamètre supérieur à 20 km sont donc assez grands pour avoir excavé cette ancienne croûte. L'excavation de la croûte Noachienne a déjà été proposée par *Carter et al.*, [2010] pour expliquer l'observation avec CRISM d'affleurements enrichis en olivine associés à des phyllosilicates dans les pics centraux de certains grands cratères [20-230km] des plaines du nord. Certains de ces cratères montrent également des dunes ou des bancs de sable enrichis en olivine à proximité de ces affleurements suggérant qu'ils aient été formés à partir de matériau érodé et transporté depuis ces affleurements. Ceci est en accord avec l'observation CTX présentée sur la Figure 89 qui suggère que le sable sombre enrichi en olivine présent dans le fond du cratère provienne d'un affleurement issu de ce qui semble être son pic central. Bien qu'à la résolution d'OMEGA il ne soit pas possible de contraindre la composition des petits affleurements présents au niveau des pics centraux, compliquant la mise en évidence d'un lien direct avec les bancs et dunes de sable sombre enrichis en olivine présents à côté, nous considérerons ici que ces derniers sont toutefois formés à partir de matériau excavé de la croûte noachienne pendant l'impact puis érodé. L'olivine associée aux éjectas de certains de ces grands cratères a très probablement la même origine primitive, bien qu'on ne puisse pas exclure qu'une partie soit reliée aux laves hespériennes enrichies en olivine.

Le grand dépôt enrichi en olivine observé dans la région d'Utopia Planitia montre une texture rugueuse similaire à celles observées au niveau des plaines et des fonds de cratères hespérien enrichis en olivine de l'hémisphère sud et correspondant à des laves érodées. Ce dépôt pourrait donc être un affleurement des plaines volcaniques hespériennes enrichies en

olivine mises en évidence par les petits cratères présentés plus haut et qui auraient rempli la région d'Utopia Planitia. Il serait dans ce cas un autre témoin de cet épisode de volcanisme intense pendant le début de la période hespérienne. Cependant, sa localisation particulière dans l'unité amazonienne d'Elysium Planitia (Ael3) définie comme étant d'origine volcanique [Skinner et al., 2006 ; Werner et al., 2009] suggère que ce dépôt puisse être relié à un épisode de volcanisme dans la région d'Elysium survenu entre 3.3 et 3.4 Ga (section 1.3.3.2). Ceci en ferait le seul dépôt enrichi en olivine de cette étude associé à du volcanisme amazonien et suggérerait que la composition enrichie en olivine des laves ne soit pas restreinte à la période du début Hespérien. Si tel est le cas, ceci repose la question de la différence de composition entre les terrains Noachiens et les terrains plus jeunes.

4.2.4 Dépôts d'olivine dans Valles Marineris

4.2.4.1 Contexte géologique

Deux types de dépôts d'olivine sont observés dans la région de Valles Marineris : des dépôts plutôt étendus avec des signatures faibles de type 1, et des dépôts très localisés avec des signatures fortes de type 2 (Figure 91) (voir annexe 1 pour les rapports de spectres).

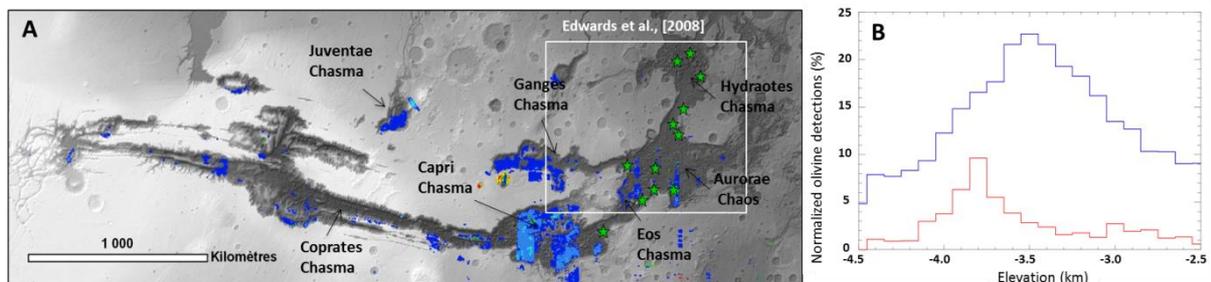


Figure 91. (A) Carte régionale des détections d'olivine dans la région de Valles Marineris. Les étoiles vertes représentent les affleurements montrant de fortes signatures d'olivine (type 2). La région encadrée en blanc correspond à celle étudiée par *Edwards et al., [2008]*. (B) Histogramme regroupant les détections d'olivine de type 1 (bleu) et de type 2 (rouge) en fonction de leur altitude (l'histogramme des détections de type 2 est multiplié par 10 pour une meilleure visualisation).

Les dépôts localisés et de fortes signatures de type 2 sont observés dans le fond du canyon : sur les bords et dans les terrains chaotiques au niveau de Aurorae Chaos, ainsi que dans Eos, Ganges et Hydraotes Chasmata (étoiles vertes sur la Figure 91). Certains de ces dépôts ont déjà été observés auparavant par *Christensen et al., [2003]* et *Edwards et al., [2008]* grâce aux données THEMIS dans leur région d'étude encadrée en blanc sur la Figure 91. Un des plus gros de ces dépôts, déjà observé par *Edwards et al., [2008]*, situé près de la paroi nord d'Aurorae Chasma est présenté sur la Figure 92. Ce dépôt d'olivine, comme les autres de fortes signatures présents dans Valles Marineris, montre un albédo plus clair que la surface environnante et une température THEMIS de nuit importante suggérant une inertie thermique élevée. Cette inertie thermique, calculée à 600 tiu par *Edwards et al., [2008]* est en accord avec l'aspect de socle rocheux observé sur les images CTX (Figure 92) comparée à la morphologie non consolidée de la surface qui l'entoure. Ces observations suggèrent que ces dépôts appartiennent à un sous bassement rocheux en partie mis à jour dans le fond de Valles Marineris et entouré de matériau mobile.

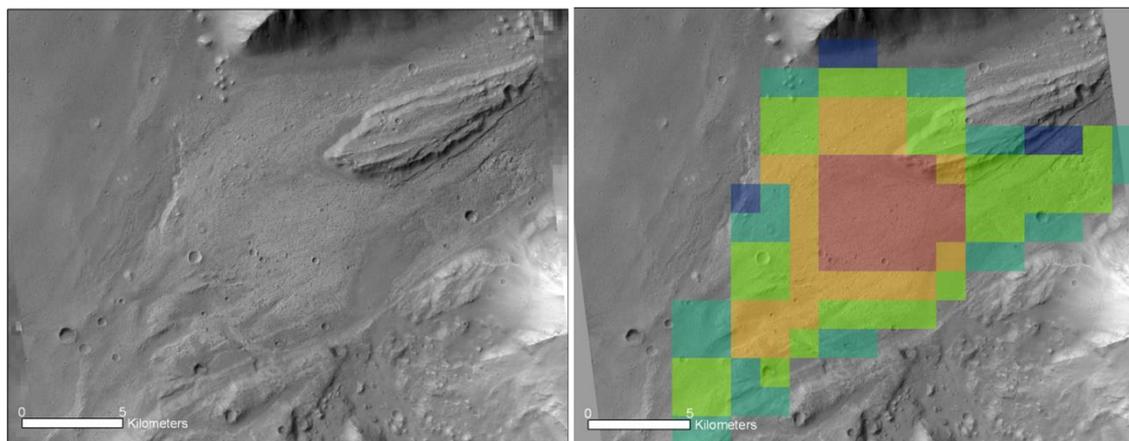


Figure 92. Exemple d’affleurement enrichi en olivine localisé près de la paroi nord d’Aurorae Chasmas dans le fond de Valles Marineris [-34.6°E, 3.2°S]. On peut observer l’albédo plus clair et la morphologie rugueuse de cet affleurement.

La Figure 93 montre un gros plan sur une zone localisée dans les terrains chaotiques au sud d’Aurorae Chaos. Dans cette région, l’olivine est associée à l’unité sablonneuse qui entoure les sortes de buttes et petites mesas qui composent ces terrains chaotiques. Cependant, les plus fortes signatures sont observées sur des affleurements qui semblent associés à ces buttes et qui présentent des caractéristiques assez similaires au dépôt étudié précédemment dans le nord d’Aurorae Chaos i.e. un albédo plutôt clair, une température THEMIS de nuit relativement élevée et une texture rugueuse et consolidée. Ces affleurements ressemblent à des sortes de terrasses rocheuses qui peuvent être recouvertes de petits monticules pauvres en olivine (Figure 93B et C). Ils n’apparaissent qu’à une certaine altitude de -3770 et -3760 m respectivement pour les deux affleurements présentés sur les Figure 93B et C comparés à -3940 m pour la base. Cette morphologie suggère que ces dépôts enrichis en olivine soient présents à la base des buttes et qu’ils aient été en partie mis à jour après l’érosion de la partie supérieure de ces dernières pauvres en olivine. Des morphologies similaires sont observées dans la région de Hydraotes Chasmas, située à environ 700 km des dépôts précédents, et où l’olivine est associée à des affleurements qui apparaissent à la base des buttes chaotiques à une altitude d’environ -3900 m contre environ -4300 m pour le sol. Afin de mettre en évidence une tendance générale au niveau de l’altitude de ces affleurements, nous avons regroupé toutes les signatures d’olivines observées uniquement dans Valles Marineris dans un histogramme en fonction de leurs altitudes MOLA (Figure 91B). Cet histogramme montre que les fortes signatures de type 2 principalement associées à ces affleurements enrichis en olivine, sont majoritairement détectées entre -3600 et -3900 m. Ceci est en accord avec nos observations ainsi qu’avec celles d’*Edwards et al.*, [2008] qui a trouvé la même tendance et proposé que ces affleurements représentent des portions d’une couche plus large et continue de matériau enrichi en olivine s’étendant dans les régions d’Aurorae Chao et d’Eos, Ganges et Hydroates Chasmata. On peut cependant remarquer ici qu’un nouveau dépôt a été détecté par OMEGA en dehors de la zone étudiée par *Edwards et al.*, [2008], à l’extrémité ouest d’Eos Chasmas, suggérant que cette couche puisse être encore plus étendue.

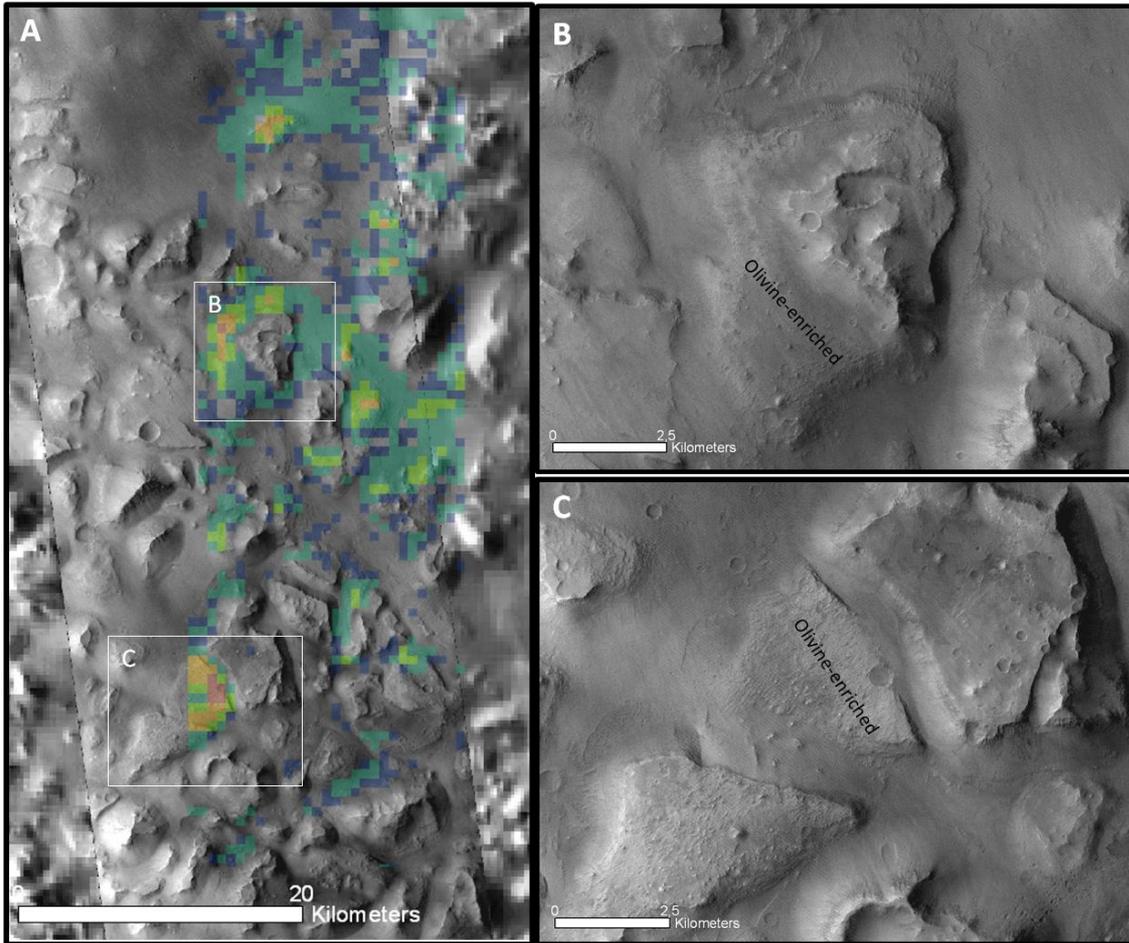


Figure 93. (A) Détections d'olivine associées à des affleurements dans une région chaotique au sud d'Aurorae Chaos [-32.2°E, 10.6°S]. (B) et (C) Gros plan CTX sur les deux affleurements encadrés en blanc sur la figure (A).

Les dépôts étendus et de faibles signatures d'olivine (type 1) sont principalement observés dans Capri Chasma, l'est de Ganges chasma et Juventae Chasma (dépôts cartographiés en bleu sur la carte de la Figure 91). Cependant leurs signatures d'olivine sont plutôt associées au sable accumulé sur le sol plutôt qu'à des affleurements rocheux (Figure 94). Dans ces trois régions, les plus fortes signatures étant principalement associées aux terrains chaotiques, il est cependant possible que ce sable provienne de l'érosion d'une couche enrichie en olivine présente à la base des buttes chaotiques comme proposée pour les régions au sud d'Aurorae Chaos et dans Hydraotes Chasma. Cependant, cette éventuelle couche enrichie en olivine n'est pas observée ni avec OMEGA et THEMIS, ni à plus haute résolution avec CRISM [*Flahaut, communication personnelle*] dans ces régions, laissant l'origine de ce sable enrichi en olivine non contrainte.

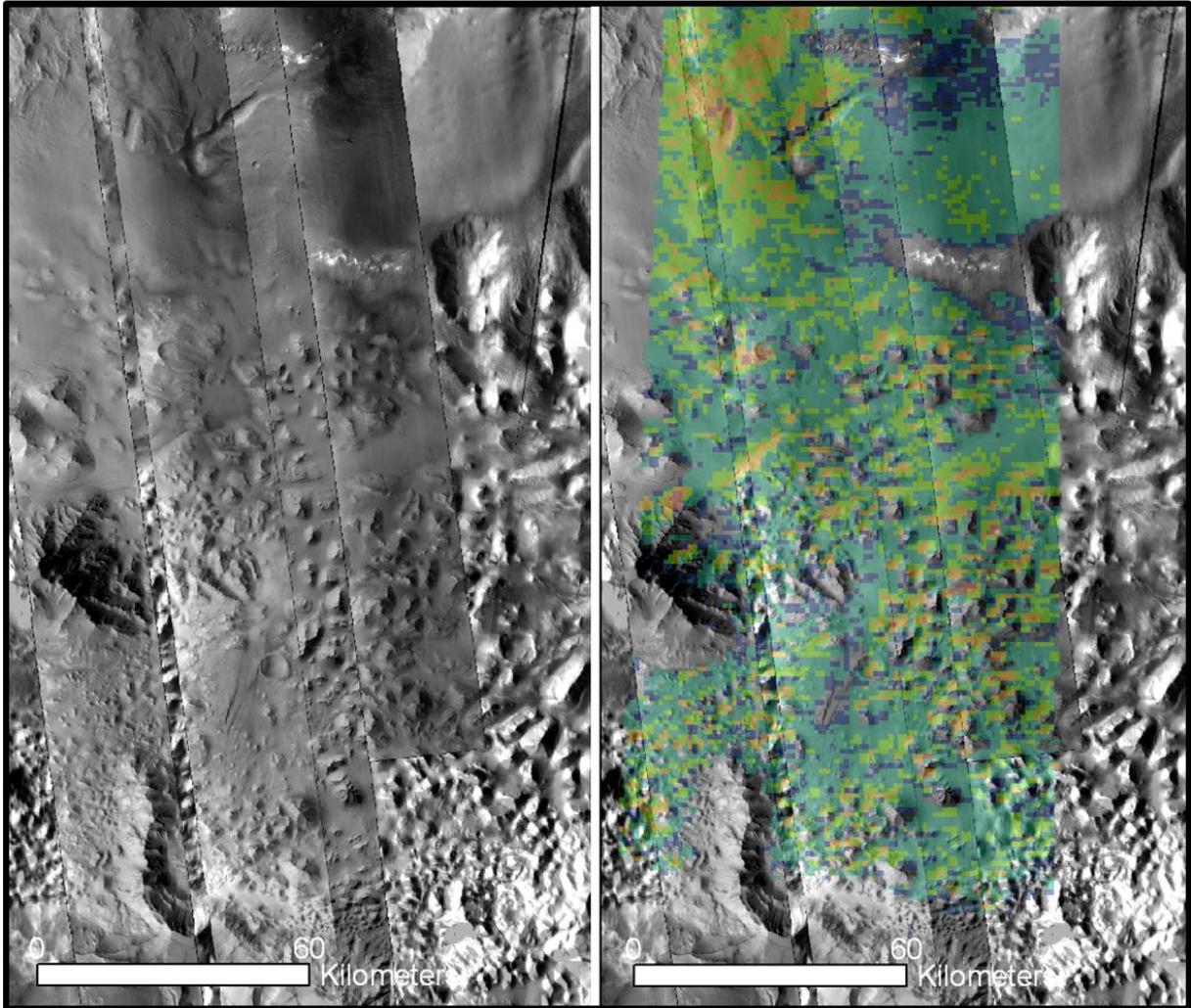


Figure 94. Détections d'olivines associées à du sable accumulés entre les buttes formants les régions chaotiques dans la région de Capri Chasma [-48.8°E, 16°S].

On peut observer sur la Figure 91 que des dépôts d'olivine de type 1 sont également détectés dans certaines régions à l'ouest de Valles Marineris, le long du canyon de Coprates Chasma et dans Noctis Labyrinthus. Cependant ces dépôts sont observés à une altitude bien plus élevée que celle de la couche d'*Edwards et al.*, [2008] et dans des contextes à première vue différents, ces dépôts n'ont pas été étudiés dans cette thèse.

4.2.4.2 Origines et implications

Les détections d'olivine observées dans les régions d'Aurorae Chaos, de l'ouest de Ganges Chasma et d'Eos et hydroates Chasmata sont toutes associées à des affleurements montrant des caractéristiques morphologiques, thermophysiques et stratigraphiques similaires : albédo clair, température THEMIS de nuit plutôt élevée, texture rugueuse et consolidée indiquant une surface plutôt rocheuse, et une surface exposée à une altitude principalement comprise entre -3600 et -3900 m suivant les dépôts. Ces observations suggèrent que ces affleurements fassent partie d'une couche très étendue enrichie en olivine et exposée à cet intervalle d'altitude dans les régions d'Aurorae Chao et d'Eos, Ganges et Hydroates Chasmata comme proposé par *Edwards et al.*, [2008]. L'étendue de cette couche a été estimée par *Edwards et al.*, [2008] à $6.6 \times 10^5 \text{ km}^2$, cependant l'observation par OMEGA d'un nouveau dépôt similaire à l'extrémité ouest d'Eos Chasma ainsi que la présence de sable enrichi en olivine dans les régions de Capri, Ganges et Juventae Chasmata provenant peut être de l'érosion d'une couche

sous-jacente enrichie en olivine, indique que cette couche puisse être bien plus étendue dans le canyon de Valles Marineris.

Edwards et al., [2008] a proposé plusieurs origines pour expliquer la présence de cette couche. L'hypothèse retenue propose que cette couche résulte d'écoulements de laves primitives enrichies en olivine reliées aux premiers stades du volcanisme dans Tharsis (section 1.3.3). Ces laves auraient par la suite été recouvertes par des laves plus évoluées et plus différenciées et donc plus pauvres en olivine. Une hypothèse similaire a été proposée par *Tornabene et al.*, [2008] et reprise dans la section 4.2.1.4 pour expliquer la présence d'olivine au sud d'Isidis, ainsi que dans les éjectas de cratères au niveau des grandes plaines hespériennes et de Sytis Major, qui serait le résultat de l'éruption de laves enrichies en olivine dans les premiers stades de volcanisme au niveau de ces régions volcaniques. Cependant, dans le cadre de cette hypothèse, on peut s'étonner d'observer la plupart des détections d'olivine dans la partie est de Valles Marineris et non dans la partie ouest qui est la plus proche du dôme de Tharsis. De plus, *Flahaut et al.*, [2012] a montré que les empilements de laves provenant de Tharsis s'arrêtaient principalement au niveau de Coprates Chasma, rendant difficile l'interprétation des affleurements enrichis en olivine présents dans Hydraotes Chasma, situés à plus de 1500 km de Coprates Chasma, comme résultants de ces écoulements de laves.

Les résultats précédents ont montré que la plupart des dépôts enrichis en olivine observés à la surface de Mars pouvaient être expliqués par une origine commune identifiée comme étant un épisode intense de volcanisme fissural enrichie en olivine durant le début de l'Hespérien. En plus d'avoir rempli les dépressions et les cratères de l'hémisphère sud ainsi qu'une grande partie des plaines du nord, ce volcanisme pourrait donc être également responsable de la formation de cette couche enrichie en olivine dans la région de Valles Marineris. Cette hypothèse est appuyée par les nombreuses plaines et fonds de cratères enrichis en olivine observés sur le plateau de Valles Marineris. Il se pose cependant la question d'une origine intrusive ou extrusive de cette couche. En effet, l'ouverture de Valles Marineris à ~3.5 Ga est contemporaine de cet épisode de volcanisme hespérien qui a rempli certaines plaines et cratères de l'hémisphère sud jusqu'à cette époque (Figure 77). Des laves auraient donc tout aussi bien pu recouvrir le fond de Valles Marineris après et/ou pendant son ouverture, que former une couche plus ou moins horizontale entre -3700 et -3900 km sous la surface, couche qui aurait été mise à jour lors de l'ouverture du canyon de Valles Marineris et de l'érosion de sa base.

Pour finir, on peut noter que le plateau enrichi en olivine détecté dans la région de Chryse Planitia et étudié dans la section 4.2.3 (Figure 86), montre des propriétés et une altitude d'affleurement similaires à celles des affleurements enrichis en olivine détectés dans l'est de Valles Marineris. Ce plateau se situe dans la prolongation de Valles Marineris à une distance d'environ 1200 km d'Hydraotes Chasma ce qui est relativement proche quand on considère la taille minimale de 1100 km de la couche d'olivine détectée dans Valles Marineris [*Edwards et al.*, 2008]. Ceci suggère que le plateau observé dans la région de Chryse Planitia et originellement associé aux détections des plaines du nord puisse faire partie de la même couche enrichie en olivine que celle détectée dans Valles Marineris, appuyant l'hypothèse que les plaines du nord et cette couche d'olivine puissent avoir une origine commune associée à l'épisode de volcanisme global hespérien.

4.2.5 Affleurements enrichis en olivine dans l'hémisphère sud

Comme nous l'avons mentionné plus haut, l'inspection plus détaillée des détections d'olivine faites en baissant le seuil du critère OSP2 a permis de détecter de l'olivine associée à des petites buttes observées autour du bassin d'Hellas (Figure 95A). Ces buttes sont néanmoins

situées en dehors de la terrasse d'Hellas, certaines bien plus loin que celles discutées dans la section 4.2.2. Elles ont l'aspect de blocs rocheux et montrent une texture rugueuse dans les zones non recouvertes par du matériau formé de particules plus fines (Figure 95D). Comme dans le cas des buttes observées sur les terrasses d'Argyre et d'Hellas, ces blocs montrent les plus fortes signatures d'olivine associées aux régions à plus haute température THEMIS de nuit qui correspondent principalement aux pentes où la roche affleure, suggérant que l'olivine soit associée à la roche. La plupart de ces buttes sont localisées à la limite extérieure est de la terrasse d'Hellas dans des unités exclusivement noachiennes appelées « mountainous material (Nm) » [Skinner et al., 2006] et entourées par les plaines volcaniques d'Hesperia Planum. Cette unité Nm est définie comme étant du matériau très ancien provenant de la croûte et remonté à la surface pendant l'impact. Les autres buttes sont observées dans le nord, nord-est et nord-ouest du bassin d'Hellas associées à des unités noachiennes (Npld et Npl2) [Skinner et al., 2006] et présentent des morphologies et propriétés similaires à celles observées dans les unités très anciennes Nm, suggérant qu'elles puissent être également formées de matériau crustal remonté à la surface pendant l'impact.

Si ces dépôts d'olivine correspondent effectivement à du matériau crustal remonté à la surface pendant l'impact, ils représentent les seuls témoins observés par OMEGA de matériau d'âge Noachien enrichi en olivine dans les terrains de l'hémisphère sud. D'autres témoins ont peut être été observés par CRISM, qui a détecté du matériau enrichi en olivine dans les pics centraux de certains cratères de l'hémisphère sud, interprété comme étant du matériau crustal noachien excavé pendant l'impact [Skok et al., 2011]. Ces observations, en plus des dunes sombres et éjectas enrichis en olivine associés aux larges cratères des plaines du nord, appuient l'idée que la croûte Noachienne très ancienne puisse être, au moins en certains endroits, enrichie en olivine. Étant donné la taille du bassin d'Hellas, on ne peut cependant pas exclure ici que ces buttes enrichies en olivine soient des éjectas de croûtes et de manteau éjectés pendant l'impact similaires à celles observées sur la terrasse d'Hellas et d'Argyre.

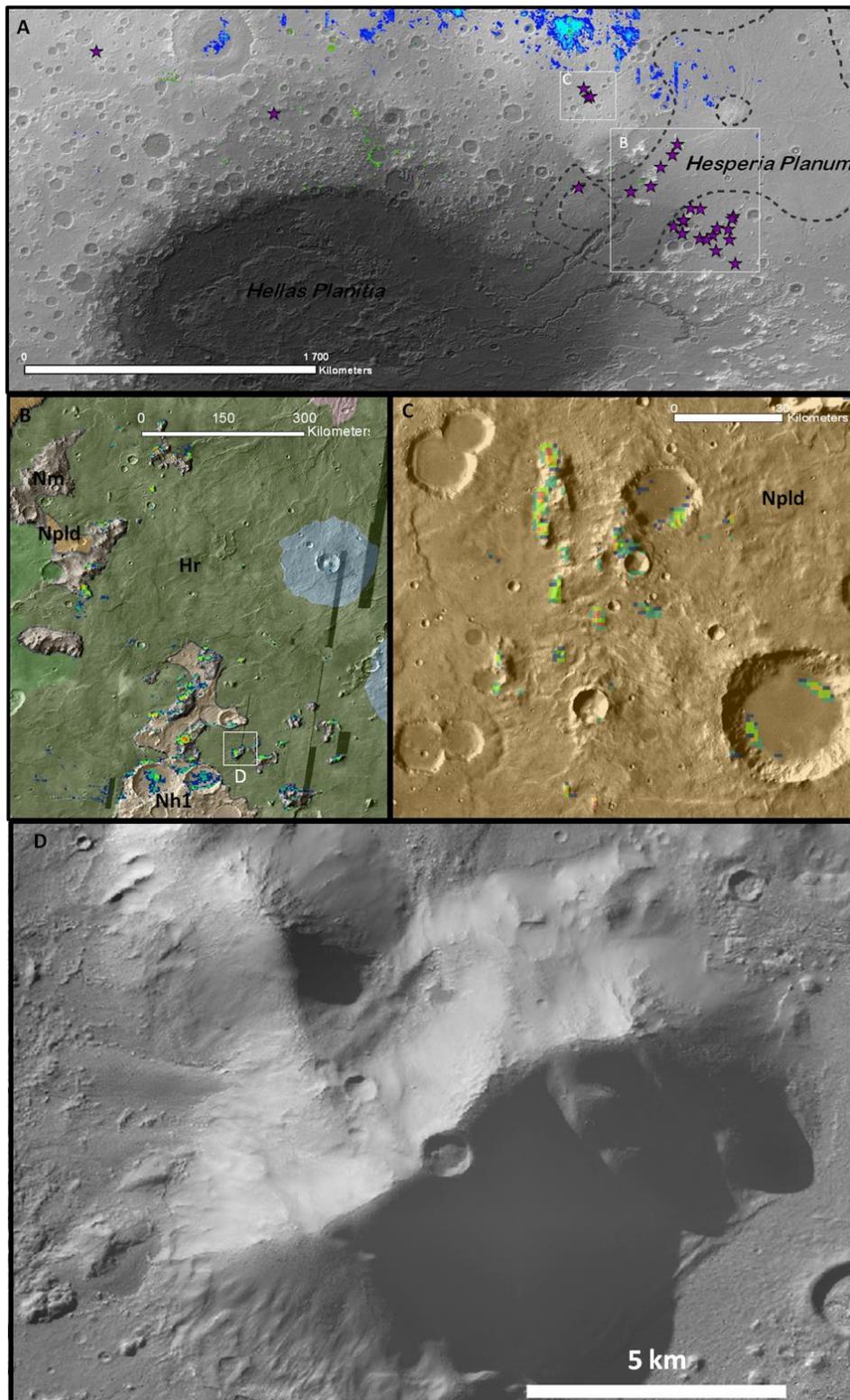


Figure 95. (A) Cartes d'olivine indiquant la localisation des buttes noachiennes enrichies en olivine observées autour du bassin d'Hellas (étoile violette). (B) Gros plan sur certaines de ces buttes avec la carte géologique USGS en fond : (marron) unités Noachiennes Nh1, Npld et Nm (« mountainous material », marron foncé) ; (vert) unité hespérienne Hr. Les détections d'olivine sont exclusivement localisées sur les unités Nm définies comme étant du matériau crustal remonté à la surface pendant l'impact. (C) Idem pour d'autres buttes enrichies en olivine observées dans une unité Noachienne et montrant la même morphologie que celles observées dans les unités Nm. (D) Gros plan CTX sur une des buttes enrichies en olivine (encadrée en blanc sur la figure (B))

4.3 Conclusion

Les principaux résultats et implications de cette étude sont discutés en détail dans chaque section et sont résumés sur la Figure 96.

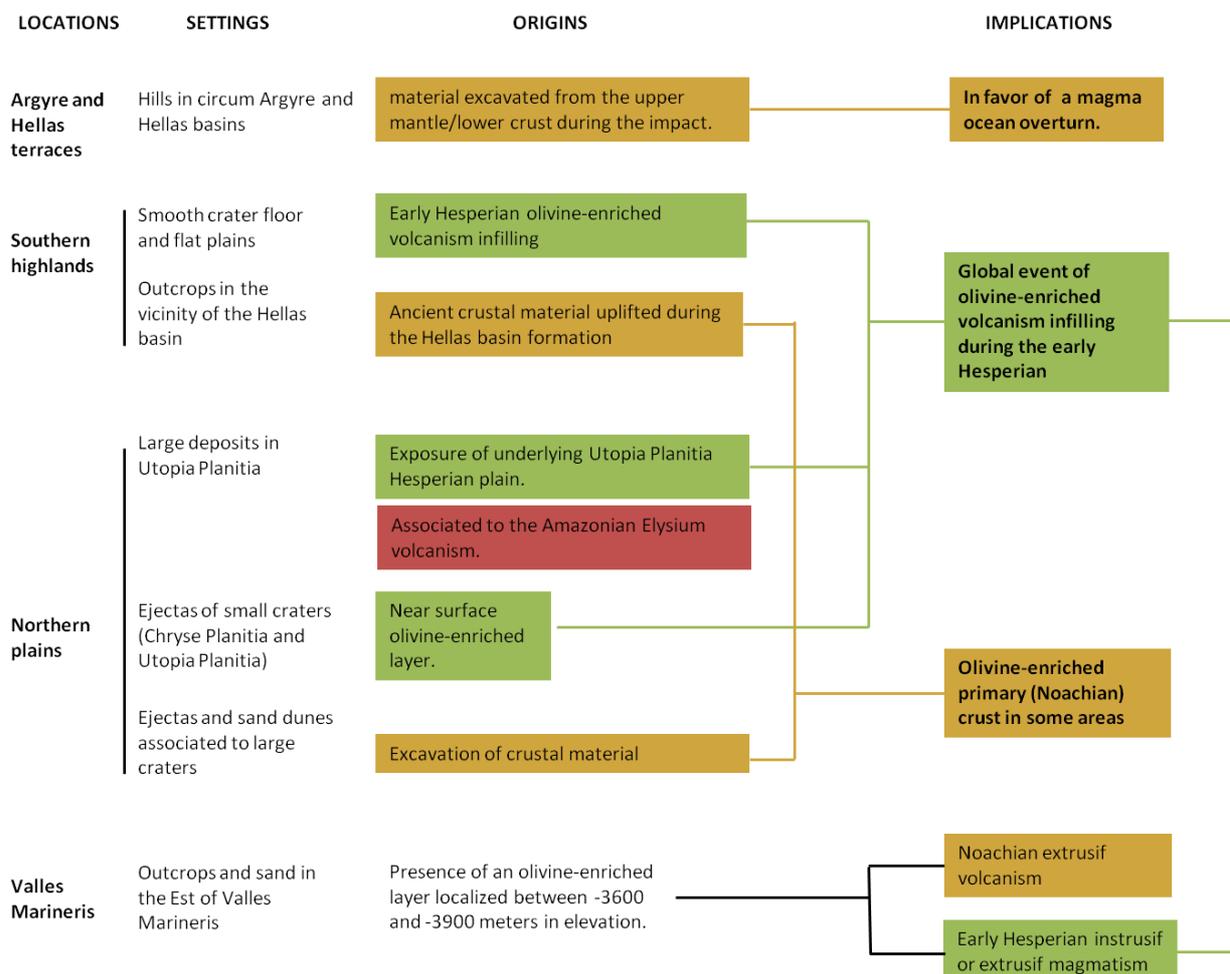


Figure 96. Résumé des résultats obtenus dans cette étude et de leurs implications. Les couleurs correspondent à l'époque de formation de ces dépôts (marron : Noachien ; vert : Hespérien ; rose : Amazonien).

Un des principaux résultats de cette étude est la mise en évidence d'un événement de volcanisme planétaire enrichi en olivine durant la période du début Hespérien. Cet événement a rempli certains cratères et dépressions présents dans l'hémisphère sud ainsi qu'une partie des plaines du nord avec des laves enrichies en olivine. Ces résultats obtenus à partir d'une étude minéralogique indépendante confirment les études géologiques antérieures qui prédisaient la formation de plaines volcaniques ridées (unité Hr) dans l'hémisphère sud ainsi que dans une grande partie des plaines du nord au début de l'Hespérien [Tanaka et al., 1988, Head et al., 2002]. L'enrichissement en olivine des laves qui ont à la fois rempli les cratères et dépressions de l'hémisphère sud et celles qui ont recouvert les plaines du nord renforce le lien entre le remplissage de ces régions des deux hémisphères et suggère une remontée globale de magma par volcanisme fissural, i.e. directement depuis le manteau au travers de fractures présentes dans la croûte. Cet événement peut être assimilé à celui ayant permis la formation des mers lunaires et résultant du chauffage du manteau par les éléments radioactifs présents. Cette étude a montré que cet événement aurait également pu être à l'origine de la couche d'olivine dans la région de Valles Marineris ainsi que des premiers stades de volcanisme dans les grands massifs

volcaniques hespériens tels que Syrtis Major, Hesperia Planum et Thaumasia Planum. En se basant sur les études géologiques, *Head et al.* [2002] ont suggéré que cet événement volcanique majeur datant du début de l'Hespérien, aurait recouvert environ 30 % de la surface de Mars. Les nouveaux dépôts d'olivine mis en évidence dans cette étude augmentent de façon significative ce taux de ressuscage, ce qui pourrait avoir des conséquences majeures sur l'évolution du climat martien. On peut d'ailleurs se demander ici si cet événement de volcanisme planétaire pourrait être à l'origine du changement climatique globale qui eu lieu entre l'époque Noachienne et l'époque hespérienne [*Phillips et al., 2001 ; Bibring et al., 2006*]. La composition particulière de cet événement de volcanisme, qui semble montrer une composition mafique à ultramafique, ainsi que son ampleur planétaire, pourrait également permettre de poser des contraintes importantes sur la composition du manteau martien, sa stratigraphie ainsi que sur l'évolution de l'activité interne de la planète.

L'enrichissement en olivine des laves hespériennes remet en question l'absence de signatures d'olivine dans les terrains noachiens formant la majeure partie des terrains de l'hémisphère sud. Ceci pourrait provenir d'une différence dans la composition originelle des laves noachiennes qui seraient alors moins riches en olivine que les laves hespériennes et que les laves primitives (voir plus bas). Ceci pourrait indiquer une évolution de la température du manteau, avec son refroidissement durant le Noachien et la réaugmentation de sa température au début de l'Hespérien, suggérant un changement dans ses sources de chaleur, ou une évolution dans la profondeur de formation du magma. *Bandfield et al.* [2011] propose cependant deux solutions alternatives : (1) que cette croûte noachienne visible en surface ait été formée à partir de laves plus évoluées et donc moins riches en olivine probablement déposées au travers d'un volcanisme explosif ; (2) qu'elle ait subi une altération mécanique et chimique l'ayant appauvrie en olivine comme cela est observé dans le cratère de Gusev. L'absence d'olivine dans les éjectas de cratères et dans les produits de l'érosion de ces terrains noachiens, ainsi que le fait que les plaines et fonds de cratères hespériens enrichis en olivine ne montrent pas de traces importantes d'altération, suggèrent cependant que si altération il y a eu, celle-ci aurait agi principalement pendant l'époque noachienne en altérant en profondeur les terrains.

La petite taille (<10 km) de certains des cratères présentant des éjectas enrichis en olivine dans les plaines du nord (Chryse, Acidalia et Utopia Plabitia) suggère que les laves, qui ont en grande partie resurfacé ces régions durant l'Hespérien, soient présentes à de faibles profondeurs sous la surface. Ceci a deux implications principales : (1) la couche de sédiments que les recouvrent est peu épaisse (<100 m) au moins dans ces régions ; (2) ces sédiments basaltiques pourraient être en partie formés localement à partir de l'altération mécanique des laves sous-jacentes en accord avec certaines études morphologiques [*Catling et al., 2001 ; 2012*]. On peut également noter que l'olivine étant un minéral qui s'altère très vite, sa présence dans les éjectas de cratères (petits et gros) et dunes dans les plaines du nord, la faible épaisseur des sédiments présents, leur composition basaltique et l'absence de bande à 1.9 μm sont des arguments qui vont à l'encontre de la présence d'une grande quantité d'eau (« ocean ») dans ces régions après la formation de ces cratères (Hespérien-Amazonien) comme cela avait été suggéré par certaines études pour expliquer l'aspect sédimentaires de ces régions (morphologie lisse, caractéristiques diélectriques, topographie, radar, etc...) [*e.g. Mouginot et al., 2012*].

Les gros cratères présents dans ces régions étant assez gros pour avoir excavé de la croûte primitive et/ou noachienne, l'olivine observée sur les éjectas de certains de ces cratères et dans des dunes accumulées dans leurs fonds suggère que cette croûte ancienne puisse être enrichie en olivine au moins en certains endroits, en accord avec les observations CRISM [Carter et al., 2010]. Les buttes enrichies en olivine détectées autour du bassin d'Hellas, définies comme étant du matériau crustal remonté à la surface pendant l'impact [*Skinner et al., 2006*], ainsi que les pics centraux enrichis en olivine observés par CRISM dans certains cratères de l'hémisphère sud, pourraient être des témoins de cette croûte primitive enrichie en olivine dans cette région. On peut cependant se poser la question ici de l'absence d'éjectas enrichis en olivine associés aux nombreux grands cratères de l'hémisphère sud comme cela est observé dans les plaines du nord. Ceci pourrait être expliqué par un enrichissement en olivine non homogène de cette croûte primitive et/ou noachienne, ou par un enfouissement de cette croûte plus en profondeur dans

l'hémisphère sud. De manière alternative, cet enrichissement en olivine pourrait être plus spécifique à la croûte primitive et/ou noachienne présente dans les plaines du nord et être le résultat des processus à l'origine de la dichotomie globale (impact géant, processus de formation de la croûte primitive, etc.).

Enfin, les buttes enrichies en olivines observées sur les terrasses des bassins Argyre et d'Hellas ont été interprétées comme étant des éjectas de manteau et de croûte fondue éjectés pendant l'impact. Si cette interprétation est juste, ces petites buttes seraient les seuls témoins directs de la composition du manteau qui a jusqu'ici été principalement contraint à partir de celle des météorites martiennes. L'enrichissement en olivine de ces petites buttes est en accord avec les modèles qui prévoient que le manteau supérieur de Mars soit riche en olivine. Les signatures spectrales et les résultats des modélisations indiquent une composition plutôt forstéritique et une abondance de l'ordre de 15-20% en moyenne. Cette composition est en accord avec les données TES et THEMIS, et suggère que le manteau supérieur de Mars soit composé d'olivine plutôt pauvre en fer. En se référant aux travaux d'*Elkins-Tanton et al.* [2003, 2005a], ces résultats suggèrent que la croûte primitive de Mars se soit formée par cristallisation du manteau suivit d'un retournement (overturn). L'abondance de cette olivine reste cependant plus faible que celle prévue par les modèles qui est plutôt de l'ordre de 60 %, ce qui pourrait s'expliquer par un mélange avec de la croûte fondue.