

## IRRADIATION ET PRÉ-IRRADIATIONS DE LA BRÈCHE 14307 \*

J. C. LORIN, P. PELLAS, et G. POUPEAU

CNRS et Laboratoire de Minéralogie du Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, France

et

L. SCHULTZ et P. SIGNER

Institut de Cristallographie et Pétrographie,  
École Polytechnique Fédérale, Zurich, Switzerland

(Reçu le 11 Décembre, 1972)

**Abstract.** Sample 14307,30, a gas-rich breccia (Group 1 of Warner, 1972) has been studied by coupling track method and light noble gas isotopic analysis. The breccia is made of a glassy dark matrix with embedded millimeter to sub-millimeter sized angular light xenoliths. These ones are breccia fragments of higher grade metamorphic facies (Group  $\geq 2$ ). A lighter strata ( $\sim 0.5$  cm thick) intersects the dark matrix.

Noble gas analysis have shown the dark matrix ( $^{36}\text{Ar} = 5.4 \times 10^{-4}$  cc STP/g) to be enriched in solar type gases with respect to the light fractions ( $^{36}\text{Ar} \leq 2.2 \times 10^{-4}$  cc STP/g). The *mean value* of the bulk 'exposure age' for different samplings is  $180 \pm 20 \times 10^6$  yr, as calculated from spallogenic  $^3\text{He}$ ,  $^{21}\text{Ne}$  and  $^{126}\text{Xe}$  contents, using our data and those of Bogard and Nyquist (1972). After appropriate correction for radiogenic  $^{40}\text{Ar}$ , the ratio  $^{40}\text{Ar}_{\text{exc}}/^{36}\text{Ar}_{\text{tr}}$  is about 5.

A total of 390 crystals coming from 11 locations either in the dark matrix, the lighter strata or a light xenolith (0.25 cm diam), have been studied by track analysis using optical and scanning electron microscopy. 181 crystals were thoroughly investigated by means of the latter technique. The following results were obtained:

(1) 72 crystals (70–300  $\mu\text{m}$  diam) from one location (No. 12) in the matrix show a *minimum* track density distribution spreading over 3 orders of magnitude (from  $2 \times 10^6$  up to  $2 \times 10^9$   $\text{cm}^{-2}$ ). The spectrum has at its lower edge a well defined peak ( $\sim 50\%$  of total crystal number) around  $3 \times 10^6$   $\text{cm}^{-2}$ . Grains with track density variations over a factor of 3 have a low abundance as compared to average lunar soils. Moreover the mineralogy of this location is peculiar due to its large abundance in orthopyroxenes. Considering the lower edge of the track density distribution a *maximum* surface residence time of  $5 \times 10^6$  yr can be set for rock 14307 in its *present shape*;

(2) 11 feldspars (1–15  $\mu\text{m}$  diam) and 22 clinopyroxenes (70–130  $\mu\text{m}$ ) have been studied in the light xenolith. All crystals have minimum track densities larger than  $10^8$   $\text{cm}^{-2}$ . No spatial variation of track-densities ( $2.5 \pm 0.5 \times 10^9$   $\text{cm}^{-2}$ ) were found in feldspars inside a millimeter-sized polished section. Clearly these tracks were not acquired by an irradiation of the xenolith as an individual entity, but survived its own formation as a breccia of Group 2. Therefore, solar energetic iron particle tracks have not been erased despite a complex mechanical and thermal history involved by two subsequent brecciation processes;

(3) in the 10 other locations, crystals (70–200  $\mu\text{m}$  diam) either from the dark matrix or the lighter strata show a significant departure from the pattern observed in lunar soils; namely:

(i) the minimum track density distribution is strongly peaked at high values ( $\sim 1\text{--}4 \times 10^9$   $\text{cm}^{-2}$ ) for  $\sim 95\%$  of the crystals, the remaining  $\sim 5\%$  having low-values ( $0.2\text{--}1 \times 10^7$   $\text{cm}^{-2}$ );

(ii) the abundance (2%) of crystals with track density variation over a factor of 3 is about one order of magnitude less than in average lunar soils;

(iii) the magnitude of track density gradients within single crystals is small. In fact, the *largest* track density variation versus depth found can be described by the relation  $\rho \propto D^{-0.5}$ , in contrast with soil grains which generally exhibit a variation of the form  $\rho \propto D^{-1.1 \pm 0.4}$ .

The above observations imply that the peculiar irradiation characteristics of these fossilized soils are more likely to be attributed to some wide scale process rather than to some accidental or local phenomena.

\* Paper dedicated to Prof. Harold C. Urey on the occasion of his 80th birthday on 29 April 1973.

Attempts to account for these findings by present solar VH particle flux and energy distribution (as determined by Crozaz and Walker, 1971; Fleischer *et al.*, 1971b; Price *et al.*, 1971), current estimates of lunar fine scale erosion, accumulation and turn-over rates, have proven essentially negative. The bulk 'exposure age' of the breccia, rather low by lunar soil standards, makes things even worse.

For lack of any better explanation, the above observations could be more easily understood by postulating a higher flux (by factors from  $\sim 10$  up to 200) and a harder energy spectrum (at least for particles with rigidity less than 0.3 GV) for the solar cosmic rays at the time the constituents of the breccia were part as loose grains of the lunar regolith.

### Mots-clés ('Key Words')

- (1) Rayonnement Cosmique Solaire ('solar flares')=RCS
- (2) Rayonnement Cosmique Galactique=RCG
- (3) Cristaux riches en traces ('crystals with minium track density'  $> 10^8 \text{ cm}^{-2}$ )=CRT
- (4) Ions du groupe du fer:  $20 < Z < 30$  (Fe group nuclei)=ions VH
- (5) Microscopie électronique à balayage ('Scanning electron microscopy')=MEB

### 1. Introduction

Les brèches et microbrèches lunaires peu métamorphosées et enrichies en gaz solaires résultent de l'agglomération de sols, probablement à la suite de phénomènes d'impacts. Les mécanismes de formation de ces brèches n'ont pas fait disparaître les évidences d'irradiations antérieures qui peuvent être observées aussi bien par la méthode des traces d'ions lourds dans les différentes phases minérales (Crozaz *et al.*, 1970; Dran *et al.*, 1972; Hart *et al.*, 1972; Hutcheon *et al.*, 1972) que par l'analyse isotopique des gaz rares (cf. par exemple, Hintenberger *et al.*, 1971; Eberhardt *et al.*, 1972a, Kirsten *et al.*, 1972 et les références incluses). Hutcheon *et al.* (1972) ont pu ainsi mesurer de très fortes densités de traces ( $10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ) dans des grains de matrice de l'ordre de  $1 \mu\text{m}$  (brèche 14301) en utilisant la microscopie électronique à haute tension. En employant la microscopie électronique à balayage (MEB) Dran *et al.* (1972) ont pu vérifier que les densités de traces mesurés sur une vingtaine de cristaux de l'ordre de  $20\text{--}30 \mu\text{m}$  étaient comprises essentiellement entre  $10^9$  et  $10^{10} \text{ cm}^{-2}$  pour chacune des brèches 10046, 10059 et 14049. Nous rapportons dans cette étude des mesures effectuées sur des cristaux de dimensions comprises entre  $70$  et  $200 \mu\text{m}$  et appartenant à différentes phases minérales de la brèche 14307. Nous pensons de la sorte pouvoir placer certaines limites aux caractéristiques d'irradiation par les particules solaires énergétiques (que nous appellerons par commodité, bien que la locution soit impropre, 'rayonnement cosmique solaire' ou RCS). En effet, en étudiant les traces d'ions du groupe du fer (ions VH) au centre de cristaux de grandes dimensions, on explore une gamme d'énergie située au delà d'une certaine énergie minimum ( $> 5 \text{ MeV uma}^{-1}$  pour des cristaux de  $70 \mu\text{m}$  de diamètre).

Rappelons que les brèches recueillies au site Apollo 14 correspondent à la nappe Fra Mauro qui aurait été éjectée par l'impact qui a formé le Mare Imbrium, il y a  $3.8 \times 10^9$  ans (Wasserburg et Papanastassiou, 1971). Les brèches d'Apollo 14 se différencient des brèches d'Apollo 11 car on peut y observer une 'suite' métamorphique,

depuis les brèches les plus métamorphosées et recristallisées qui ne contiennent pour ainsi dire pas de traces de pré-irradiation (gaz solaires ou traces de VH solaires) jusqu'aux objets les plus friables, qui n'ont pas été équilibrés à la suite d'un processus métamorphique et qui contiennent des évidences de pré-irradiation.

## 2. Description et échantillonnage

### 2.1. DESCRIPTION DE LA ROCHE

La brèche 14307 (149.6 g), visible sur la Figure 1, a été recueillie sur les bords du cratère North Triplet (station G). Elle apparaît constituée par des fragments blancs

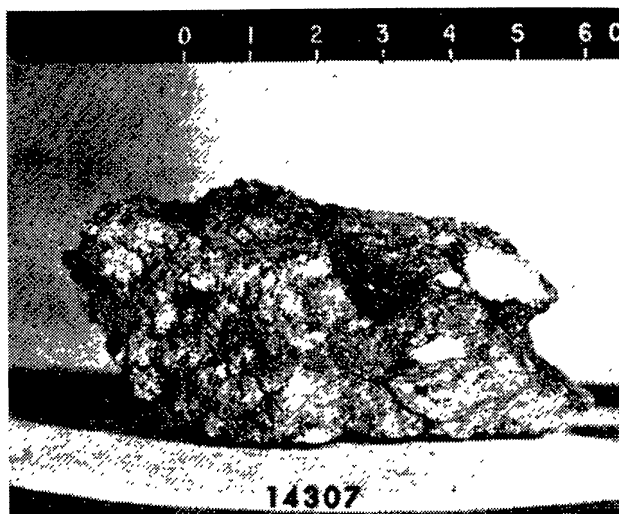


Fig. 1. Vue de la brèche 14307 (photographie LRL, NASA).

à gris blancs plus ou moins volumineux, anguleux pour la plupart, enrobés dans une matrice noire largement vitreuse. Par sa composition chimique cette brèche correspond à du matériau K-REEP typique (Hubbard *et al.*, 1972). Warner, (1972) classe cette brèche dans son groupe 1 qui correspond au faciès le moins métamorphique. En tenant compte de sa cohésion, Jackson et Wilshire (1972) lui attribuent le type F2 dans leur classification. D'un point de vue pétrographique, les inclusions blanches que nous avons observées sont constituées par une pâte cristalline feldspathique englobant des cristaux de feldspath et de pyroxène (dominance des clinopyroxènes). D'après Hubbard *et al.* (1972) la matrice vitreuse noire et les inclusions blanches plus recristallisées ne présentent pas une très nette différence de composition chimique, à l'exception de la valeur du rapport K/U (1082 pour un fragment blanc, 1500 pour la matrice noire). Il faut noter que des microcratères d'impact n'ont pas été observés à la surface de cette brèche d'après l'étude préliminaire du LRL.

### 2.2. PLAQUETTE 14307,30

L'échantillon à notre disposition 14307,30 est une plaquette ( $3.2 \times 0.5 \times 1.1$  cm) dé-

coupée du sommet (*T*) à la base (*B*) de la roche, dans sa partie centrale (Figure 2). Ces qualifications peuvent ne pas correspondre à l'orientation de la roche sur la surface lunaire qui n'est pas connue. Dans notre plaquette (Figure 3) la surface des inclusions blanchâtres représente 10–20% de la surface totale. Les contacts entre la matrice et les fragments blancs sont en général abrupts. On peut observer sur la Figure 3 que notre échantillon comporte une zone plus claire visible entre 1.9 et 2.3 cm de la face *T*. Cette zone peut représenter une stratification qui a été conservée lors de

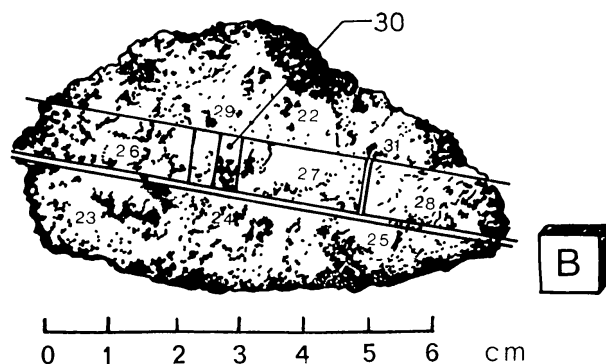


Fig. 2. Position de la plaquette 14307,30, vue de la face *B* ('bottom') avant découpage de la roche (dessin LRL, NASA).



Fig. 3. Plaquette 14307,30. De nombreux xénolithes blancs millimétriques à submillimétriques, anguleux pour la plupart, sont englobés dans la matrice noire. On distingue une strate plus claire, de couleur grise (entre 1.9 et 2.3 sur l'échelle centimétrique) qui traverse la plaquette.

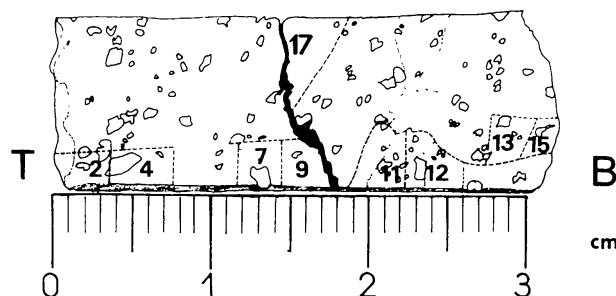


Fig. 4. Localisation et numérotation des différentes prises étudiées sur la face de la Figure 3.

la formation de la brèche (cf. Section 4.2). Il faut signaler que la surface externe  $T$  est recouverte d'une éclaboussure ('glass splash') de verre bulleux de teinte grise d'une épaisseur de 0.5–1 mm, qui se différencie nettement de la matrice noire sous-jacente. L'examen détaillé en microscopie stéréoscopique des surfaces externes  $B$  et  $T$  n'a pas permis d'identifier de microcratères d'impact de diamètre supérieur à  $30\ \mu\text{m}$ , pour une surface d'observation de  $1\ \text{cm}^2$ . D'éventuels microcratères inférieurs à  $30\ \mu\text{m}$  ne peuvent pas être identifiés avec nos conditions d'observation.

## 2.3. TYPES DE PRÉLÈVEMENTS

### 2.3.1. Méthode des traces

Compte tenu de l'inhomogénéité de la brèche, différents types de prélèvements ont été effectués après sciage :

- (a) prélèvements dans la strate claire;
- (b) différentes prises provenant du xénolithe blanc le plus volumineux, situé à 0.3 cm de la face  $T$  (Figure 5);

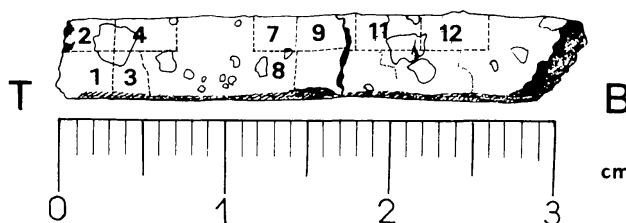


Fig. 5. Localisation et numérotation des différentes prises étudiées sur la face adjacente à celle représentée dans les Figures 3 et 4.

- (c) plusieurs prises de matrice noire, enrichie après soustraction de la plus grande partie des fragments blancs (matrice noire  $> 95\%$ ).

La plupart des prises ont été broyées et les attaques chimiques faites sur des fragments à granulométrie comprise entre 100 et  $400\ \mu\text{m}$ . Quelques fragments extraits du xénolithe blanc n'ont pas été broyés: leurs dimensions étaient comprises entre 0.5 et 1.5 mm.

Les différents prélèvements effectués le long de l'axe  $T-B$  de la plaquette sont indiqués par des numéros sur les Figures 4 et 5. Ces prises, qui peuvent paraître importantes (entre 30 et 100 mg), ont été rendues nécessaires par la fraction très faible de cristaux utilisables pour la révélation des traces (cf. 3.2.).

### 2.3.2. Gaz rares

Après broyage en une granulométrie inférieure à  $100\ \mu\text{m}$ , une séparation à l'aimant a permis d'obtenir deux fractions enrichies en matrice noire et en inclusions blanches. Comme il apparaît sur la Figure 3, la prise analysée No. 17 est relativement déficiente en inclusions blanches, ce qui a entraîné une contamination importante de la fraction blanche par la matrice noire (de l'ordre de 30%).



### 3. Techniques expérimentales

#### 3.1. GAZ RARES

Chacun des deux échantillons a été enveloppé dans une feuille de nickel et laissé plusieurs jours sous vide à la température ambiante dans une branche latérale du four à extraction. Les méthodes d'extraction, de purification et d'analyses isotopiques sont celles décrites récemment par Nyquist *et al.* (1972).

#### 3.2. TRACES D'IONS VH

##### 3.2.1. Techniques de révélation

Plusieurs techniques de révélation des traces ont été utilisées pour étudier les caractéristiques d'irradiation de la brèche:

(a) Révélation des traces à partir de sections minces de fragments enrobés, polis et attaqués dans une solution de soude très diluée. Cette méthode n'a été appliquée que pour l'étude des feldspaths au MEB qui nécessitent seulement des attaques de durée très courte.

(b) Attaque dans une capsule de platine de nombreux fragments broyés avec des solutions de soude plus ou moins concentrées et pendant des durées variables, fonction des phases minérales à étudier. Les concentrations et temps d'attaque typiquement employés pour les observations au MEB sont les suivants:

- plagioclases: (6 g NaOH + 8–16 cc H<sub>2</sub>O), 10–20 min;
- clinopyroxènes: (6 g NaOH + 6 cc H<sub>2</sub>O), 10–15 min;
- orthopyroxènes: (6 g NaOH + 5 cc H<sub>2</sub>O), 20–30 min.

Les résidus d'attaque sont ensuite posés sur un porte-objet, métallisés et observés directement au MEB. Il faut noter que cette technique d'attaque élimine des quantités considérables de matière; les fractions subsistantes représentent moins de  $10^{-3}$  (en poids) de la prise initiale. Les Figures 6, 7, et 8 montrent quelques cristaux observés au MEB après avoir utilisé cette technique de révélation. Sur la Figure 6 on peut observer la cavité laissée par une inclusion riche en uranium, dissoute au cours de l'attaque et les traces de fission radiales révélées dans le clinopyroxène non lamellaire qui l'englobait. Sur le côté opposé, à une distance supérieure à 10  $\mu\text{m}$  on peut observer des traces d'ions VH. Celles-ci sont visibles agrandies sur la Figure 7 dans un autre champ de vue du même cristal ( $\rho_{\text{VH}} = 3.7 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ ). La Figure 8 montre une inclusion feldspatique riche en traces ( $1.2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ ) dans un clinopyroxène non encore révélé. Les photographies des Figures 6, 7, et 8 ont été prises sur des cristaux provenant de la prise No. 12 (strate claire).

(c) Une synthèse des deux méthodes précédentes consiste, en ajustant les temps d'attaque, à éliminer les fractions chimiquement les plus réactives (minéraux endommagés par chocs ou irradiations, phases vitreuses) et de recueillir, sous forme de résidu, des cristaux qui seront ultérieurement enrobés dans l'époxy, polis et attaqués pour la révélation des traces. Ces cristaux résiduels qui se comportent, pour la plupart, comme de bons détecteurs de traces sont essentiellement des clinopyroxènes à struc-

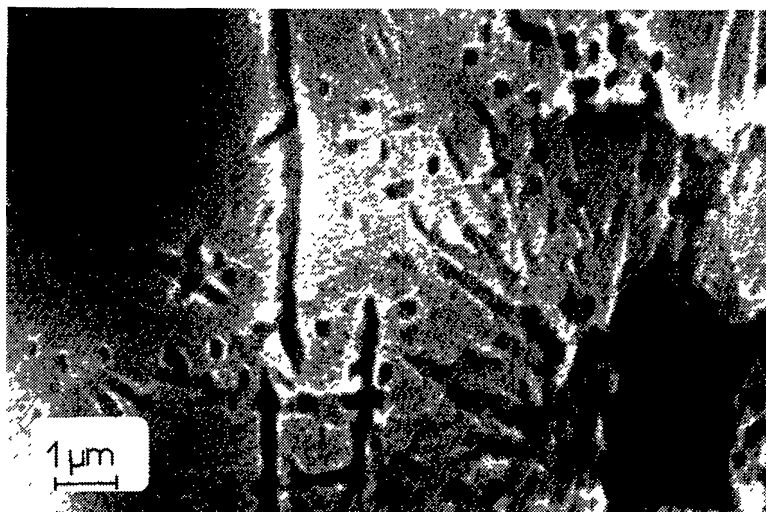


Fig. 6. Cavité rectangulaire qui contenait une inclusion riche en uranium dans un clinopyroxène. L'inclusion a été dissoute par l'attaque chimique pour la révélation des traces. On observe les traces de fission radiales révélées dans le clinopyroxène. (Cliché MEB, Lab. Géol. Muséum, Paris).  
Prise No. 12.

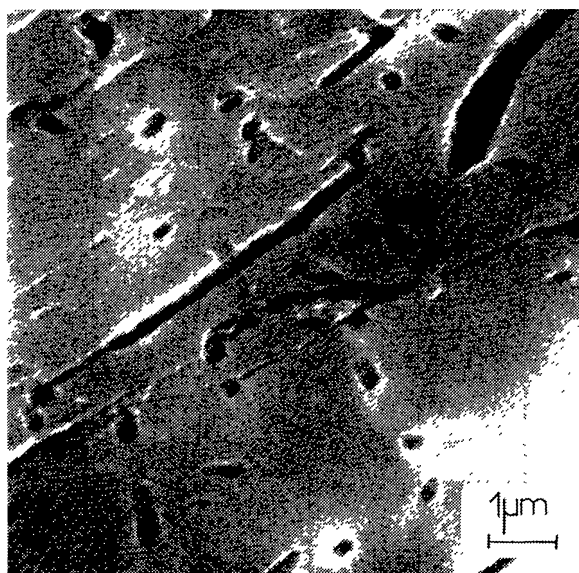


Fig. 7. Autre zone du cristal précédent, avec une densité homogène de traces d'ions VH ( $\rho = 3.7 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ ). (Cliché MEB, Lab. Géol. Muséum, Paris). Prise No. 12.

ture souvent lamellaire, quelques olivines et des orthopyroxènes non lamellaires.

Les comptages de traces d'ions VH effectués en microscopie optique ont requis des durées d'attaque doubles de celles nécessaires pour l'observation des traces au MEB.

### 3.2.2. *Représentativité des prélèvements*

Le fait que la plupart des cristaux que nous avons étudiés – des clinopyroxènes en majorité dans le cas de la matrice noire – soient des résidus d'attaques chimiques qui représentent beaucoup moins d'un millièème (en poids) de la prise initiale pose la question de la représentativité de notre échantillonnage. La matrice noire, vitreuse

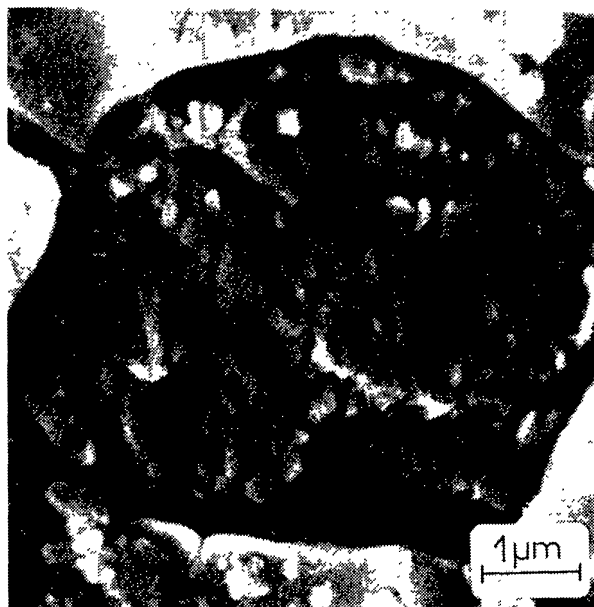


Fig. 8. Inclusion de feldspath ( $6\ \mu\text{m}$  de diamètre) dans un pyroxène non encore révélé. La densité de traces dans le feldspath est de  $1.2 \times 10^9\ \text{cm}^2$ . (Cliché MEB, Lab. Géol. Muséum, Paris). Prise No. 12.

dans sa plus grande partie, contient des phases minérales identifiables parmi lesquelles les plagioclases sont prédominants. Mais ceux-ci très facilement affectés par les effets de choc, disparaissent très rapidement au cours des attaques avec les solutions sodiques. Cela conduit à un enrichissement de la fraction pyroxénique dans les résidus d'attaque. Nous n'avons cependant pas remarqué de différences – en ce qui concerne les caractéristiques d'irradiation – entre les plagioclases que nous avons pu étudier et les nombreux clinopyroxènes provenant de la matrice noire. Tous ces minéraux sont pour la plupart très fortement irradiés. Si les effets de choc ont différenciellement affectés les phases minérales, il ne nous est pas apparu que celles-ci aient été différenciellement irradié (cette observation est valable aussi pour la prise No. 12 provenant de la strate claire).

Nous en concluons que les cristaux étudiés, provenant des résidus d'attaque, doivent correspondre aux fractions les moins choquées et peut-être aussi les moins irradiées par les ions VH. Nos conditions d'observation permettent en effet seulement de mesurer des densités de traces jusqu'à  $\sim 7 \times 10^9\ \text{cm}^{-2}$  (cf. ci-dessous 3.2.3.). On peut donc imaginer que des cristaux ayant reçu des doses d'irradiation beaucoup plus élevées soient détruits lors des processus de révélation, aussi bien du fait de leur très grande réactivité chimique que des dommages occasionnés dans les structures cristallines.

En résumé, les différentes variétés de cristaux que nous avons étudiées par la méthode des traces nous paraissent représenter une sélection de cristaux de la matrice noire et de la strate claire les moins endommagés par les contraintes physiques.

### 3.2.3. Conditions d'observation

Les densités de traces inférieures à  $10^8\ \text{cm}^{-2}$  ont été pour la plupart comptées en



microscopie optique ( $G=1500\times$ ). Le MEB a été utilisé pour déterminer les densités supérieures jusqu'à  $7\times 10^9\text{ cm}^{-2}$ . Dans ce dernier cas nous nous sommes astreints à ne compter que les traces les plus contrastées et présentant le plus souvent des orifices rectangulaires, ce qui est très fréquent pour les pyroxènes. Nos critères de comptage correspondent en fait à réduire d'un facteur variant de 1.2–2 le nombre total d'orifices ('total pit densities') observés au MEB. Le fait que ce facteur ne soit pas constant est dû aux caractéristiques cristallographiques différentes des surfaces étudiées.

#### 4. Résultats et interprétations

##### 4.1. GAZ RARES

Dans le Tableau I figurent les résultats des analyses obtenus sur les deux échantillons. Les effets de discrimination de masse ont été corrigés pour chaque isotope. Les blancs ont entraîné des corrections inférieures à 0.5% pour chacun des isotopes, à l'exception de  $^{40}\text{Ar}$  pour lequel une correction maximale de 5% a été effectuée. Les marges d'erreur rapportées dans le Tableau I comprennent la somme des différentes erreurs (poids des échantillons, détermination des concentrations des gaz, blancs et effets de dérive). Dans le Tableau I nous avons aussi transcrit les résultats obtenus par Bogard et Nyquist (1972) pour d'autres échantillons de la même brèche. Il faut signaler que leur fraction blanche provient d'un xénolithe volumineux (de l'ordre du centimètre) qui apparemment ne contient qu'une quantité très faible de gaz solaires puisque les gaz spallogéniques y sont très prédominants. De ce point de vue une comparaison entre leur fraction blanche et la nôtre contaminée par une importante contribution de matière noire, ne peut pas être significative.

Dans nos deux échantillons la composante des gaz solaires piégés est importante. Par voie de conséquence une évaluation des isotopes spallogéniques est seulement possible pour  $^3\text{He}$  et  $^{21}\text{Ne}$ , en appliquant les méthodes décrites par Eberhardt *et al.* (1970), mais cela entraîne des erreurs importantes comme on peut le vérifier dans le Tableau II. En utilisant les compositions chimiques déterminées par Hubbard *et al.* (1972) pour la matrice noire et l'inclusion blanche volumineuse, ainsi que les taux de production de Bogard *et al.* (1971) et Huneke *et al.* (1972), des 'âges d'exposition' peuvent être dérivés. L'âge calculé pour notre échantillon enrichi en fractions blanches figure dans le Tableau II, ainsi que ceux obtenus à partir des résultats de Bogard et Nyquist. La valeur moyenne de l'âge d'exposition de la brèche 14307 évalué à partir des isotopes spallogéniques  $^3\text{He}$ ,  $^{21}\text{Ne}$  et  $^{126}\text{Xe}$  correspond à  $180\pm 20\times 10^6$  ans. Cet 'âge' est plus élevé que celui obtenu à partir de  $^3\text{He}$  et  $^{21}\text{Ne}$  mesurés dans le xénolithe blanc volumineux par Bogard et Nyquist. Dans ce dernier cas des pertes par diffusion sont possibles, quoique non certaines, car le xénolithe blanc volumineux est localisé à la surface de la brèche. Il est aussi possible que le xénolithe blanc étudié par Bogard et Nyquist corresponde à un matériau choqué ou très recristallisé, qui aurait perdu une très importante fraction des gaz solaires et spallogéniques qu'il contenait. Dans cette dernière hypothèse, le métamorphisme par choc et la recristallisation de ce xénolithe n'auraient pu avoir lieu qu'antérieurement à la formation de la brèche 14307.

TABEAU I  
Concentrations et compositions isotopiques de l'hélium, néon et argon de la brèche 14307

	Poids échantillon en mg	<sup>3</sup> He en 10 <sup>-6</sup> cc STP g <sup>-1</sup>	<sup>4</sup> He	<sup>20</sup> Ne	<sup>36</sup> Ar	<sup>40</sup> Ar	<sup>20</sup> Ne/ <sup>22</sup> Ne	<sup>22</sup> Ne/ <sup>21</sup> Ne	<sup>36</sup> Ar/ <sup>38</sup> Ar
14307, 30, 17 (matrice noire)	2.11	45.7 ± 2.2	121000 ± 5000	2680 ± 120	537 ± 20	2960 ± 120	12.0 ± 0.6	30.5 ± 1.5	5.37 ± 0.03
14307, 30, 17 (fractions blanches)	2.92	20.2 ± 0.9	50100 ± 2000	1130 ± 60	219 ± 9	1340 ± 50	12.3 ± 0.9	28.6 ± 1.2	5.25 ± 0.04
14307, 26 (matrice noire) <sup>a</sup>	19.32	26.0	70740	1322	310	1763	12.24 ± 0.04	29.4 ± 1.2	5.38 ± 0.02
14307, 26 (matrice noire) <sup>a</sup>	10.76	16.3	42020	1250	83	486	12.38 ± 0.04	29.1 ± 0.9	5.38 ± 0.02
14307, 26 (xénolithe blanc) <sup>a</sup>	35.62	1.0	1240	0.71			2.73 ± 0.01	1.331 ± 0.002	

<sup>a</sup> Bogard et Nyquist (1972).

TABLEAU II  
Concentrations en isotopes spallogéniques et 'âges d'exposition' de différentes fractions de la brèche 14307

	<sup>3</sup> He	<sup>21</sup> Ne	<sup>126</sup> Xe	'Ages d' exposition' calculés avec		
	en 10 <sup>-8</sup> cc STP g <sup>-1</sup>			<sup>3</sup> He en 10 <sup>6</sup> ans	<sup>21</sup> Ne	<sup>126</sup> Xe
14307, 30, 17 (fractions blanches)	200 ± 70	30 ± 13	—	200 ± 90	170 ± 90	—
14307, 26 (matrice noire) <sup>a</sup>			0.0125 ± 0.0015			170 ± 90
14307, 26 (xénolithe blanc) <sup>a</sup>	100	19.4	0.0183 ± 0.0021	100	110	210 ± 80

<sup>a</sup> Bogard et Nyquist (1972).

dans sa forme actuelle. On ne peut enfin écarter la possibilité que le xénolithe blanc volumineux ait eu une histoire d'irradiation différente de celle des autres fragments qui constituent la brèche 14307. En effet le rapport  $^{131}\text{Xe}/^{126}\text{Xe}_{\text{sp}} \simeq 7.5$  mesuré dans ce xénolithe par Bogard et Nyquist (1972) indique que celui-ci a été irradié, pendant une fraction de son temps d'exposition au RCG, sous une épaisseur de matière importante où le flux de neutrons épithermiques favorisait la production de  $^{131}\text{Xe}$  à partir de  $^{130}\text{Ba}$  (Eberhardt *et al.*, 1971; Kaiser et Berman, 1972). Dans le cas de la matrice noire analysée par Bogard et Nyquist, le rapport  $^{131}\text{Xe}/^{126}\text{Xe}_{\text{sp}}$  est voisin de 6. La valeur de ce rapport indique que le matériau constituant la matrice noire a été irradié par un flux intégré de neutrons épithermiques moins intense, comparé à celui qui a irradié le xénolithe blanc volumineux. Toutefois, en tenant compte de toutes les sources d'erreur, cette différence entre les flux de neutrons épithermiques n'est peut-être pas significative. On peut observer cependant que les concentrations en  $^{126}\text{Xe}_{\text{sp}}$  mesurées dans le xénolithe blanc volumineux et la matrice noire par Bogard et Nyquist fournissent sensiblement le même âge d'exposition, aux erreurs près (Tableau II). Si le xénolithe blanc volumineux a été irradié, pendant une fraction importante de son temps d'exposition, sous une grande épaisseur de matière, il est évident alors que les taux de production utilisés pour calculer l'âge d'exposition au moyen des isotopes  $^3\text{He}$  et  $^{21}\text{Ne}$  ne seraient pas applicables.

Il est important de signaler que notre échantillon de matrice noire, et à un moindre degré l'échantillon enrichi en inclusions blanches, contiennent de très fortes concentrations d'excès d'argon 40. Environ 90% de l'argon 40 dans la matrice noire ne peut pas correspondre à la production radiogénique à partir de la concentration en potassium mesurée par Hubbard *et al.* (1972). La valeur du rapport  $^{40}\text{Ar}_{\text{excès}}/^{36}\text{Ar} \simeq 5$  mesuré dans la matrice noire est plus élevée que celles obtenues pour des analyses globales des brèches d'Apollo 11 par Funkhouser *et al.* (1971) qui sont voisines de 2.

Il faut encore noter l'inhomogénéité des concentrations absolues en gaz solaires piégés dans les différents échantillons de matrice noire rapportés dans le Tableau I. Selon les prises analysées, on observe une variation par un facteur 6.4 en  $^{36}\text{Ar}$  solaire

piégé. Enfin, la différence des concentrations entre l'échantillon enrichi en fractions blanches et l'échantillon de matrice noire peut traduire des différences dans les degrés de métamorphisme entre ces deux fractions. Ceci est en accord avec la classification de Warner (1972), corroborée par la tentative de synthèse de Williams (1972).

#### 4.2. TRACES D'IONS VH

Les histogrammes de la Figure 9 représentent les distributions de densités *minimales* de traces mesurées dans les cristaux des différentes prises positionnées dans les Figures 4 et 5, à l'exclusion du xénolithe blanc.

Pour la clarté de l'exposé nous analysons les résultats dans l'ordre suivant:

- (1) les cristaux à faibles densités de traces répartis dans les différents prélèvements;
- (2) la strate claire;
- (3) le xénolithe blanc visible sur la figure 6, partagé entre les prises 1, 2, 3, et 4;
- (4) les cristaux très riches en traces, ou CRT, provenant de différents prélèvements effectués dans la matrice noire.

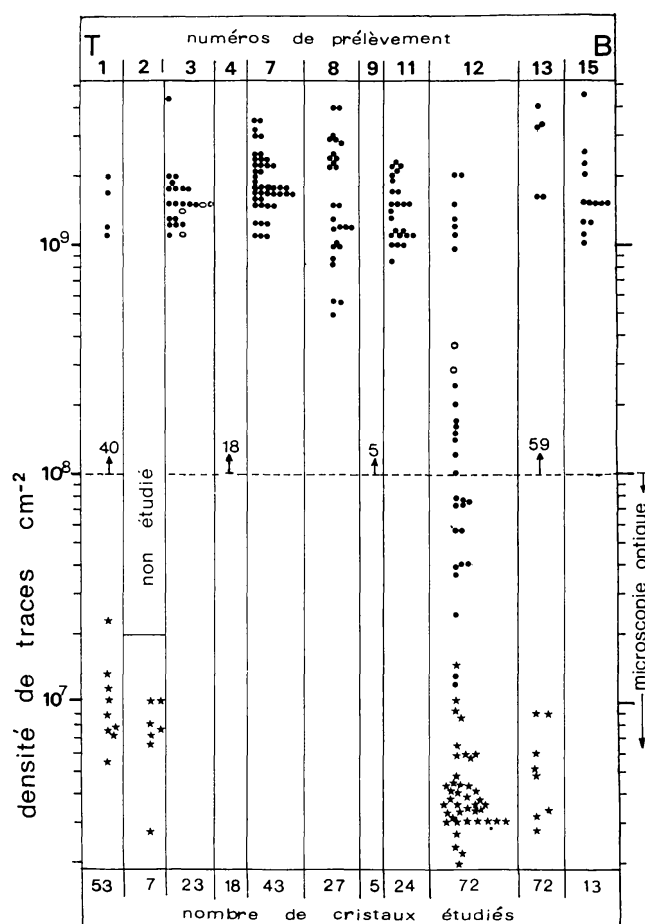


Fig. 9. Distribution des densités *minimales* de traces dans les cristaux des différentes prises échantillonnées entre les faces *T* et *B*. Les symboles représentent: étoiles, mesures au microscope optique; cercles noirs, mesures au MEB; cercles, cristaux présentant des variations de densité de traces supérieures à 3. La ligne pointillée indique la limite de résolution du microscope optique. Les chiffres fléchés au-dessus de la ligne pointillée représentent le nombre de cristaux riches en traces (CRT) non étudiés au MEB.

#### 4.2.1. Cristaux à faibles densités de traces

Dans 4 prélèvements (No. 1, 2, 12, et 13) sur les 11 étudiés une fraction des cristaux présente des faibles valeurs de densités de traces ( $< 2 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ ). En particulier, dans la prise No. 12 les plus faibles densités, mesurées dans les seuls orthopyroxènes, se groupent de façon remarquable, autour de la valeur moyenne  $3 \pm 0.25 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$  (pour 11 cristaux). Les caractéristiques (longueurs, anisotropie dans la distribution angulaire) de ces traces correspondent à celles d'ions VH. Un temps maximum de résidence à la surface pour la brèche 14307 *dans sa forme actuelle* peut être calculé à partir de ce pic de densités de traces en utilisant les taux de production de la météorite Saint Séverin (Lal *et al.*, 1969). Ce temps maximum est de  $5 \times 10^6$  an. Cette faible durée d'exposition en surface paraît confirmée aussi bien par l'absence de microcratères d'impact que par la forme irrégulière de cette brèche (Figure 1). D'autre part il existe sur la surface *T* une éclaboussure de verre qui indique peut-être que cette surface a été directement exposée. S'il en est ainsi, les densités de traces relativement faibles ( $8 \pm 2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ ) observées dans 11 cristaux localisés à moins de 0.3 cm de la face *T* (prises No. 1 et 2, Figures 5 et 9) ont pu être produites pendant un temps d'exposition de la face *T* de l'ordre de  $2-3 \times 10^6$  ans. Les âges évalués ci-dessus sont, répétons-le, des limites supérieures car la plus grande fraction des traces a pu être enregistrée, soit sous une plus grande épaisseur de matière, soit lors d'un stade d'irradiation précédant la formation de la brèche. Le fait cependant que 36 cristaux présentent des densités voisines (entre 2 et  $5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ ) à une distance comprise entre 2.4 et 3 cm de la face *T* (prises No. 12 et 13) nous conduit à penser que cette dernière hypothèse est moins plausible.

#### 4.2.2. La strate claire

La strate claire (gris clair plus précisément) visible sur la Figure 3 et signalée en pointillé sur les Figures 4 et 5, a été étudiée au moyen des prises No. 11 et 12. Chacune de ces deux prises contient une importante fraction de matrice noire (30–50% environ). Il n'a pas été possible de séparer en effet la fraction gris clair de la matrice plus noire. Les distributions des densités minimales de traces pour les prises No. 11 et 12, visibles sur la Figure 9, diffèrent remarquablement entre elles. Tandis que la prise No. 12 montre un très large spectre de densités de traces s'étendant sur trois ordres de grandeur (de  $2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$  à  $2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ ) avec une fréquence maximale pour les faibles valeurs des densités (36 cristaux sur 72 ont des densités de traces inférieures à  $7 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ ), les 24 cristaux étudiés de la prise No. 11 présentent au contraire des densités minimales de traces supérieures à  $8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ . A partir de ces résultats nous n'avons aucune indication que la strate gris clair *en tant que telle*, présente une histoire d'irradiation particulière puisque les prises No. 11 et 12 qui en contiennent une fraction montrent des caractéristiques d'irradiation très diverses.

Le comportement des prises No. 11 et 12 vis-à-vis de l'attaque chimique est aussi très différent. Pour des conditions d'attaques identiques (par exemple 6 g NaOH + 5 cc H<sub>2</sub>O pendant 40 min), toute la matière de la prise No. 11 disparaît tandis qu'une



fraction relativement importante subsiste dans le cas de la prise No. 12. En fait, parmi toutes les prises étudiées de la brèche 14307 c'est la prise No. 12 qui a donné la fraction la plus importante de cristaux résiduels. A cause de ce comportement différent des deux prises, les attaques chimiques pour la révélation des traces ont été modulées en utilisant les techniques précédemment décrites (cf. 3.2 1.a, b, c).

Il existe aussi des différences de minéralogie entre les deux prises: les pyroxènes de la prise No. 11 correspondent essentiellement à des clinopyroxènes; ceux de la prise No. 12 se partagent par moitié entre clino-pyroxènes et orthopyroxènes. De plus, les pyroxènes de la prise No. 11 présentent en majorité des structures lamellaires, comme c'est d'ailleurs le cas pour toutes les autres prises, à l'exception justement de la prise No. 12. Cette dernière observation peut être une indication qu'une fraction du matériau constituant la prise No. 12 ne présente que de faibles indices de contraintes induites par des chocs, ce qui est en accord avec les plus grandes dimensions de grains dans cette prise.

En résumé, tant l'état d'irradiation que le comportement lors des attaques chimiques, la minéralogie, les effets de choc et la granulométrie différencient les prises No. 11 et 12, malgré le fait que chacune contienne une fraction importante de la strate gris-clair. On peut remarquer aussi que la distribution des densités de traces de la prise No. 11 (Figure 9) est similaire aux distributions observées dans différents prélèvements de matrice noire (cf. 4.2.4.).

A partir des observations ci-dessus rien n'indique que les singularités constatées dans la prise No. 12 puissent être attribuées à des caractéristiques qui appartiennent en propre à la strate gris clair. Par contre, l'ensemble de nos observations pourrait être expliqué d'une manière simple si on supposait que notre prise No. 12 a échantillonné un fragment lithique KREEP à orthopyroxène (Fuchs, 1970; Hubbard et Gast, 1971, et références incluses). En particulier, le large spectre de densités de traces observé (Figure 9) impliquerait nécessairement que ce fragment hypothétique ait été soumis à une brève irradiation au voisinage de la surface par les ions VH du RCS. Dans cette hypothèse on ne peut pas exclure, en raison de la lacune dans la distribution des densités de traces entre 0.38 et  $\sim 1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ , que les 6 cristaux ayant des densités de traces supérieures à  $10^9 \text{ cm}^{-2}$  puissent provenir de la matrice adjacente noire ou gris-clair (ces 6 cristaux sont en effet des feldspaths et des clinopyroxènes). D'un autre point de vue, l'ensemble des cristaux de la prise No. 12 pourrait être considéré comme représentant un sol peu irradié, un éjecta rapidement recouvert par exemple. Cependant la proportion des cristaux à gradient de densité de traces dans la prise No. 12 est remarquablement faible ( $\sim 3\%$ ) comparée à celle des sols étudiés jusqu'à ce jour où elle s'élève en général à 15–20% (voir par exemple Luna 20, Figure 11 et même Luna 16 d'après Poupeau *et al.*, 1972). Seuls dans les sols prélevés dans des régions accidentées où des effets de pente peuvent jouer, on trouve des pourcentages très supérieurs de cristaux et de fragments lithiques à gradients, pouvant atteindre 86% (Phakey *et al.*, 1972; Berdot *et al.*, 1972a). Cette déficience en cristaux à gradient (ayant des variations de densité de traces  $> 3$ ) s'observe également dans les CRT de la brèche 14307 (cf. ci-dessous 4.2.3., 4.2.4. et notre discussion). Les Figures 6, 7, et 8

représentent l'état d'irradiation de deux cristaux provenant de cette prise No. 12, très particulière si on la compare aux résultats que nous avons obtenus dans les autres prélèvements de cette brèche.

En résumé, si la strate gris-clair constitue une entité lithologique, comme on peut le voir sur la Figure 3, qui pourrait correspondre à la préservation d'une stratification originelle que la formation de la brèche n'aurait pas effacée, nous ne pouvons pas à partir de nos résultats caractériser l'individualité de cette strate.

#### 4.2.3. *Le xénolithe blanc*

Ce xénolithe ( $\sim 0,25$  cm de diamètre) a été partagé entre les prises No. 1, 2, 3, et 4. C'est une brèche, formée de cristaux de plagioclases ( $An_{80}$  d'après J. Fabriès) et de clinopyroxènes englobés dans une matrice essentiellement feldspathique et cristalline. Les différentes techniques pour la révélation des traces précédemment décrites (3.2.1.a, b, c) ont été employées pour son étude. Les résultats obtenus sont présentés au moyen de la Figure 10 et dans le Tableau III. La Figure 10 montre un fragment millimétrique du xénolithe, avec les densités *minimales* de traces mesurées au MEB sur des cristaux de plagioclases dont les dimensions étaient comprises entre 1 et  $15 \mu m$ . Il est clair que les localisations qui ont pu être étudiées dans ce fragment de xénolithe fournissent des densités de traces très homogènes et élevées ( $2.5 \pm 0.5 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ ). Des pyroxènes de plus grandes dimensions ( $70\text{--}130 \mu m$ ) prélevés dans deux autres localisations du xénolithe et observés au microscope optique, après révélation des traces, ont été classés comme CRT ( $\geq 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ). Ils figurent dans le Tableau III.

Les remarques suivantes peuvent être faites à partir de nos observations:

(a) il n'est pas possible de considérer, compte-tenu des caractéristiques du RCS actuel, que le xénolithe ait pu être irradié en tant que fragment lithique individuel avant son inclusion dans la brèche. Cela découle de la valeur homogène des fortes densités de traces observées dans le fragment millimétrique étudié (Figure 10);

(b) le xénolithe, qui correspond probablement au Groupe 2 dans la classification pétrographique de Warner, aurait donc conservé les traces d'une irradiation antérieure à deux stades de bréchification (la formation de la brèche xénolithique *et* celle de la brèche 14307). Ceci nous amène à faire certaines réserves sur la signification physique de la notion de température telle qu'elle est introduite par Williams (1972) pour expliquer la transition entre les brèches du groupe 1 et 2 ( $800^\circ\text{C}$  avec  $T \leq 10^3$  ans);

(c) bien qu'une étude systématique n'ait pas été effectuée, nous n'avons qualitativement pas détecté dans les cristaux étudiés au MEB de gradients de densité de traces (définis par une variation supérieure à un facteur 3 pour notre granulométrie:  $1\text{--}15 \mu m$ ).

(d) du point de vue des conditions d'irradiation, les cristaux et fragments de cristaux dans ce xénolithe n'apparaissent pas différents de la grande majorité des cristaux très irradiés ( $\sim 95\%$ ) étudiés dans la matrice noire (cf. 4.2.4. ci-dessous).\*

\* **Note ajoutée sur épreuve.** Des pyroxènes étudiés entretemps au MEB ont toute fois montré des densités de traces plus faibles  $10^8\text{--}10^9 \text{ cm}^{-2}$ .

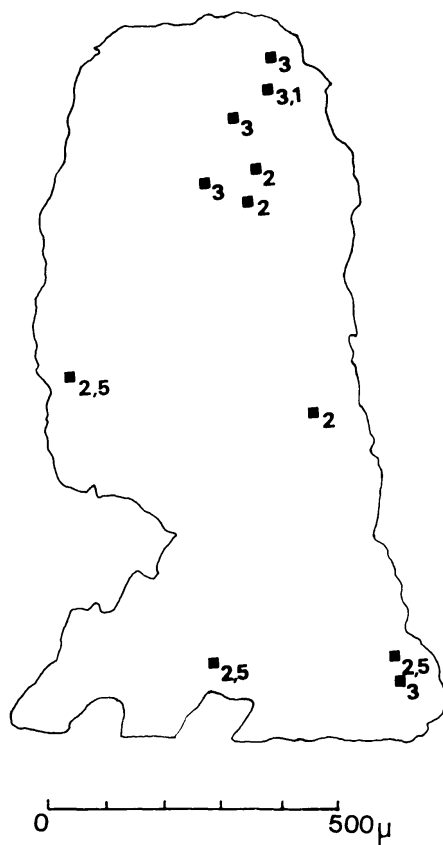


Fig. 10. Fragment du xénolithe blanc étudié en section polie au MEB. Les chiffres correspondent aux densités de traces ( $\times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ ) mesurées en différentes localisations. On peut remarquer que les densités de traces sont homogènes à  $2.5 \pm 0.5 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ .

TABLEAU III

Nombre de cristaux riches en traces (CRT) dans le xénolithe blanc  
(prises No. 2, 3, et 4 de la Figure 5) de la brèche 14307

Numéro des prises	Nombre de cristaux étudiés	$\varrho > 10^8 \text{ cm}^{-2}$ (microscopie optique)	$\varrho > 10^9 \text{ cm}^{-2}$ (MEB)
2	11 (plagioclases de 1–15 $\mu\text{m}$ )	11	11
3	12 (clinopyroxènes de 70–130 $\mu\text{m}$ )	12	<sup>a</sup>
4	10 (clinopyroxènes de 70–130 $\mu\text{m}$ )	10	<sup>a</sup>
Total	33	33	11 (100%)

<sup>a</sup> Prise non étudiée au microscope électronique à balayage (MEB).

#### 4.2.4. Les cristaux riches en traces

Nous pensons devoir extraire de nos résultats portés sur la figure 9 et le Tableau IV les points suivants, qui concernent les cristaux provenant de la matrice noire:

TABLEAU IV

Numéro des prises	Nombre de cristaux étudié	$\varrho > 2 \times 10^7$ (microscope optique)	$\varrho > 10^8$	$\varrho > 10^9$ (MEB)
1	53	45	44	(4) <sup>a</sup>
3	23	23	23	23
4	18	18	18	— <sup>b</sup>
7	43	43	43	43
8	27	27	27	22
9	5	5	5	— <sup>b</sup>
11	24	24	24	23
12	72	29	17	7
13	72	64	64	(5) <sup>a</sup>
15	13	13	13	13
Total <sup>c</sup>	278 <sup>c</sup>	262 (94%)	261 (94%)	124 (95%) <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Dans les prises No. 1 et 13, seulement 4 et 5 CRT ont été étudiés au MEB. Ces 9 CRT, ont tous montré des densités de traces supérieures à  $10^9 \text{ cm}^{-2}$  (cf. Figure 9).

<sup>b</sup> Pas d'étude au MEB.

<sup>c</sup> La prise No. 12 étant exclue.

<sup>d</sup> Totalisation pour les prises No. 3, 7, 8, 11, et 15 ou tous les cristaux ont pu être étudiés au MEB.

(a) Dans chaque prise les CRT ( $\varrho > 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ) triés au microscope optique, et qui ont pu être analysés au MEB présentent dans une proportion dépassant 90% (prise No. 8) et atteignant 95% (prise No. 11) et 100% (prises No. 3, 7, et 15) des densités de traces supérieures à  $10^9 \text{ cm}^{-2}$ . Des sondages effectués sur les prises No. 1 et 13 et portant sur 4 et 5 CRT ont montré que ceux-ci présentaient aussi des densités supérieures à  $10^9 \text{ cm}^{-2}$ . L'ensemble des CRT étudiés au MEB présentant dans la proportion de 95% des densités de traces  $> 10^9 \text{ cm}^{-2}$ , nous admettrons qu'il en est de même pour les 122 CRT (Figure 9) non étudiés au MEB. Dans les statistiques ci-dessus nous avons exclu la prise No. 2 (non étudiée, sauf pour les faibles valeurs de densités de traces) et la prise No. 12 qui, nous l'avons vue, est très particulière.

(b) La densité médiane de traces évaluée pour les 139 cristaux de la matrice noire étudiés au MEB correspond à  $2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  (pour des dimensions de grains, entre 70 et 200  $\mu\text{m}$ , et piquant à 100–120  $\mu\text{m}$ ).

(c) Trois CRT seulement (sur les 139 étudiés au MEB) présentent des gradients de densité de traces (variation de la densité de traces par un facteur supérieur à 3). En fait la variation de la densité de traces pour ces trois cristaux à gradient est comprise entre 3 et 4. Plus précisément, la variation la plus forte de la densité de traces que nous avons observée dans un cristal correspond à un facteur 2 sur une distance de 15  $\mu\text{m}$ . Le fait est surprenant, d'autant plus que la détection de cristaux à gradient a fait l'objet d'une recherche systématique au MEB (entre 5 et 8 localisations ont été

étudiées pour chaque cristal analysé). Il nous apparaît d'une part, que le pouvoir de résolution du MEB qui nous permet de mesurer des densités de traces jusqu'à  $\sim 7 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ , n'est pas en cause puisque la plupart des cristaux étudiés avaient des densités minimales comprises entre 1 et  $2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ . D'autre part, il nous semble difficile d'attribuer cette déficience de cristaux à gradient à nos conditions de révélation car le même résultat a été observé avec des conditions d'attaque très différentes et sur des phases minérales différentes (plagioclases, clinopyroxènes et quelques olivines). Nous tenons cependant à spécifier que 24% des CRT présentent des variations de densités de traces comprises entre 1.5 et 3. Mais seulement 4.6% présentent des variations entre un facteur 2 et 3.

Devant une densité médiane de traces aussi élevée ( $\sim 2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ ) pour des grains ayant des dimensions comprises entre 70 et 200  $\mu\text{m}$ , et le très faible pourcentage de CRT à gradient ( $\sim 2\%$ ), on peut s'interroger sur la nature des 'traces' que l'on observe au MEB. Ces traces, rappelons-le, correspondent à des orifices. Ces orifices sont-ils, dès lors, vraiment des traces d'ions VH? Ne pourraient-ils pas être dûs, par exemple, à des dislocations ou à des traces induites par des reculs de spallation? Analysons ces deux possibilités:

(i) Si les orifices étaient dûs à des dislocations il faudrait admettre que les mêmes distributions de défauts se retrouvent pour des phase minérales aussi différentes que les plagioclases, clinopyroxènes (augite, pigeonite) ou les quelques olivines que nous avons étudiés. Il nous semble difficile d'admettre que des détecteurs cristallographiquement aussi différents puissent présenter les mêmes densités de défauts quand on sait que leur comportement vis-à-vis des contraintes physiques (mécanique ou thermique) est très différent (cf. par exemple les études de Carter *et al.*, 1970; Chao *et al.*, 1970; Quaide et Bunch, 1970). De plus, le fait qu'un recuit de matrice noire pendant 1 heure à 800 °C fasse disparaître *tous* les orifices, que les observations soient faites au MEB ou en microscopie optique, indique que ceux-ci ne peuvent pas être assimilés à des dislocations; la guérison de celles-ci requiert en effet des énergies d'activation variables, souvent très supérieures aux énergies d'activation requises pour la guérison des traces d'ions VH.

(ii) Si les orifices étaient dûs à des reculs de spallation induits par les protons et particules  $\alpha$  du RCG, il serait difficile d'admettre que des densités de traces de recul comprises entre 1 et  $5 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  puissent être produites par ce flux et sa cascade de nucléons secondaires, sans admettre des temps d'exposition prohibitifs. Par exemple la roche 10017, dont l'âge d'exposition voisine  $500 \times 10^6$  an (Marti *et al.*, 1970; Huneke *et al.*, 1972; Eberhardt *et al.*, 1972), contient des cristaux de pyroxène dont les densités de traces attribuées par Fleischer *et al.* (1971a) aux reculs de spallation sont de l'ordre de  $2 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ .

Dans le cas de cristaux exposés au RCS, Crozaz *et al.* (1969) ont estimé au moyen d'irradiations avec des  $\alpha$  de 5 MeV  $\text{uma}^{-1}$ , que la contribution des traces de recul de spallation à la densité totale de traces était relativement faible. Nous considérons, en fonction de leur taux de production de 'traces de spallation  $\alpha$ ', que cette contribution doit être inférieure à 5% jusqu'à une profondeur d'irradiation de 100  $\mu\text{m}$  dans un



cristal d'augite exposé à la surface. On peut supposer que des ions de charges plus élevées (C, N, O par exemple), doivent avoir une plus grande probabilité d'interactions induisant des traces de spallation. Néanmoins la probabilité encore plus élevée d'enregistrement des ions VH, couplée à leur enrichissement aux basses énergies ( $E < 15 \text{ MeV uma}^{-1}$ ) par rapport aux  $\alpha$ , et même par rapport à l'oxygène (Price *et al.*, 1971; Mogro-Campero et Simpson, 1971; Lanzerotti *et al.*, 1972), nous fait estimer mineure la contribution des traces induites par les reculs de spallation.

Plus probantes encore que l'estimation précédente nous apparaissent d'ailleurs nos observations expérimentales. D'une part, en effet, la révélation des traces de spallation requiert des attaques de plus longues durées (un facteur 2 au moins) que celles nécessaires pour observer les ions VH au MEB. D'autre part, la morphologie des traces de spallation est très différente de celle des ions VH. Les premières sont caractérisées par des dépressions peu profondes et évasées ('shallow pits') qui apparaissent peu contrastées au MEB; les orifices des traces VH sont au contraire beaucoup plus contrastés et nettement identifiabiles. En outre, des répliques observées au MEB ont montré que les traces que nous attribuons aux ions VH présentent des longueurs qui ne correspondent pas à celles des traces résultant d'interactions de spallation.

Enfin la corrélation entre la richesse en gaz solaires et les fortes densités de traces déjà observée par Poupeau et Berdot (1972) dans le cas des aubrites, et approximativement vérifiée aussi dans le cas des sols lunaires (Berdot *et al.*, 1972b), suggère fortement que les orifices observés au MEB correspondent vraiment à des traces d'ions VH, tout au moins dans leur très grande majorité. Nous considérerons donc dans la discussion qui va suivre que les CRT sont des cristaux et fragments de cristaux très fortement irradiés par les ions VH. Les très fortes densités de traces mesurées impliquent que ces ions VH proviennent du RCS. A ce point, des problèmes importants se posent.

## 5. Discussion

### 5.1. 'AGE D'EXPOSITION' ET 'TEMPS DE RÉSIDENCE À LA SURFACE'

L'âge d'exposition de  $200 \times 10^6$  ans environ calculé à partir des isotopes spallogéniques ( $^3\text{He}$ ,  $^{21}\text{Ne}$ ,  $^{126}\text{Xe}$ ) (cf. 4.1 et Tableau II) et le temps maximum de résidence à la surface ( $< 5 \times 10^6$  ans) déterminé à partir des cristaux à faibles densités de traces (4.2.1.) ne sont pas contradictoires.

La notion des 'âges d'exposition' dérivés en fonction des concentrations en isotopes spallogéniques de gaz rares dans le cas de la brèche 14307 présente la même signification que les 'âges d'exposition' globaux calculés pour les sols lunaires: ils correspondent à une valeur moyenne obtenue pour des fractions plus ou moins irradiées, c'est-à-dire pour des grains irradiés à la surface *et* à différentes profondeurs dans le régolithe, chaque grain ayant sa propre histoire d'irradiation. Les isotopes spallogéniques de gaz rares intègrent donc les différentes histoires et conditions d'irradiation par le RCG des grains individuels jusqu'à des profondeurs de 3–4 m dans le régolithe, et par le RCS jusqu'à des profondeurs de quelques centimètres par rapport à la surface. A ce propos on peut noter que cette valeur moyenne de  $\sim 200 \times 10^6$  ans, extraite à

partir des isotopes spallogéniques, est relativement faible comparée aux 'âges d'exposition' de la plupart des sols lunaires analysés globalement. Elle est aussi relativement faible si on la compare à celles calculées pour d'autres brèches riches en gaz solaires, avec la seule exception à notre connaissance, de la brèche 14301 (Drodz *et al.*, 1972) pour laquelle un âge d'exposition  $^{81}\text{Kr}$ – $^{83}\text{Kr}$  de  $100 \pm 30 \times 10^6$  an a été obtenu.

La signification de l'âge maximum d'exposition à la surface, évalué à partir des faibles valeurs de densités de traces rencontrées dans certains cristaux signifie simplement que cette brèche, *dans sa forme actuelle*, n'a pas pu être exposée à la surface du régolithe lunaire pour une durée supérieure à  $5 \times 10^6$  an. Cela n'exclut pas que cette brèche pourrait avoir un temps de résidence à la surface plus élevé, si elle résultait de la fragmentation d'un bloc plus volumineux par exemple.

En résumé, l'ensemble des résultats obtenus sur la brèche 14307, tant par les gaz rares que par les traces d'ions VH, permet de considérer que les matériaux constituant la brèche ont été soumis à trois stades d'irradiation :

- (1) une exposition à la surface pour la plupart des cristaux et fragments, expliquant la richesse en gaz rares solaires et les fortes densités de traces dans les CRT ;
- (2) un stade d'irradiation en profondeur indiqué par la valeur élevée du rapport  $^{131}\text{Xe}/^{126}\text{Xe}_{\text{sp}}$  (Bogard et Nyquist, 1972), pendant lequel peut-être la plus grande fraction des isotopes spallogéniques a été produite ;
- (3) une brève exposition à la surface de la brèche dans sa forme actuelle.

## 5.2. LA BRÈCHE 14307 CONSIDÉRÉE COMME UN SOL FOSSILE

Dans la Figure 11 nous comparons les densités minimales extraites des cristaux de la brèche 14307 et celles obtenues, avec les mêmes critères de comptage au MEB, sur 48 et 35 cristaux d'anorthite des sols Luna 20 (16–27 cm de profondeur) et 15100.7 (Berdot *et al.*, 1972a). Dans la distribution 14307 les cristaux de la prise No. 12 ont été exclus, ainsi que les CRT diagnostiqués au microscope optique.

La distribution des densités dans le cas de la brèche a ceci de remarquable : les cristaux à faibles densités se groupent presque tous dans l'intervalle  $0.3\text{--}1 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$  tandis que la très grande majorité des CRT sont contenus dans l'intervalle  $1\text{--}4 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ . La lacune entre  $\sim 1 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$  et  $\sim 1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  serait encore plus importante si on soustrayait du groupe de cristaux à faible densité la contribution galactique éventuelle produite pendant l'exposition récente de la brèche à la surface (avant qu'elle ne soit recueillie par les astronautes). Cette distribution bimodale, avec une lacune aussi nette entre les deux populations de cristaux, n'existe pas pour les sols Luna 20 et 15100. Elle n'a pas non plus été observée, à notre connaissance, dans aucun des sols lunaires étudiés jusqu'à présent par la méthode des traces (cf. par exemple Arrhenius *et al.*, 1971). En d'autres mots, si on prenait n'importe quel sol étudié provenant des différents sites visités, si on le comprimait pour avoir une brèche consolidée, on n'obtiendrait pas la distribution des densités observée pour les cristaux de la brèche 14307 dans la Figure 11. Ce type de distribution bimodale se rapproche par contre de ce que l'on observe dans les matrices des météorites riches en gaz où il existe aussi deux pics dans le spectre des densités, le pic des faibles densités étant

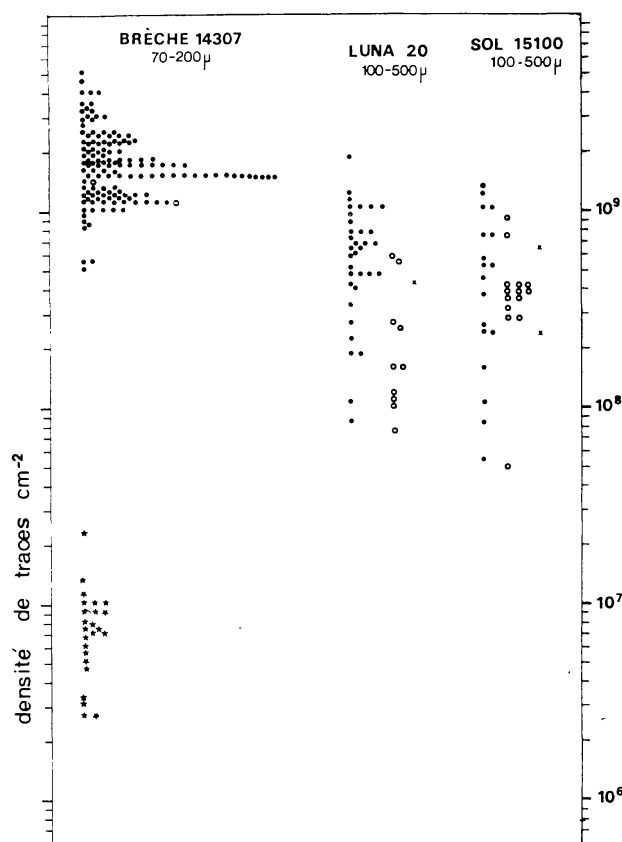


Fig. 11. Densités minimales de traces dans la brèche 14307 (prise No. 12 exclue) comparée aux histogrammes de densités minimales des sols Luna 20 (16–27 cm) et 15100,7 (station 2). Les symboles ont la même signification que dans la Figure 9; les croix représentent des cristaux avec des variations de densités de traces supérieures à 10. La brèche 14307 se caractérise par le nombre très faible de cristaux à gradient et une valeur très élevée de la densité médiane de traces ( $\sim 2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ ).

produit par l'irradiation du météoroïde par le RCG, et le pic des fortes densités correspondant aux cristaux irradiés par le RCS. Mais même dans la matrice de ces météorites la coupure entre les deux pics de fréquences maximales n'est pas aussi nette que celle observée dans la brèche (voir par exemple l'étude de Pesyanoe par Poupeau et Berdot, 1972). En ce qui concerne la très forte proportion ( $\sim 95\%$ ) de CRT à très fortes densités de traces, seule – peut-être – la composante de cristaux d'anorthite du sol Luna 16 se rapprocherait le plus du pic des CRT observé dans la brèche: la majorité des cristaux d'anorthite de Luna 16 présente des densités minimales de traces comprises entre  $\sim 0,5$  et  $\sim 2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  (Poupeau *et al.*, 1972).

En résumé, dans la mesure où la brèche 14307 correspond à un sol fossile consolidé, les caractéristiques d'irradiation de cet ancien sol apparaissent très différentes de celles observées dans les régolithes actuels.

Une comparaison avec les cristaux des brèches lunaires riches en gaz solaires étudiés par Dran *et al.* (1972) montre que ces auteurs ont observé sensiblement les mêmes caractéristiques d'irradiation que celles constatées dans 14307, ainsi qu'il apparaît dans la Figure 12. Dans cette figure l'histogramme 14307 a été normalisé en supposant que les 122 CRT diagnostiqués en microscopie optique présentaient la même dis-

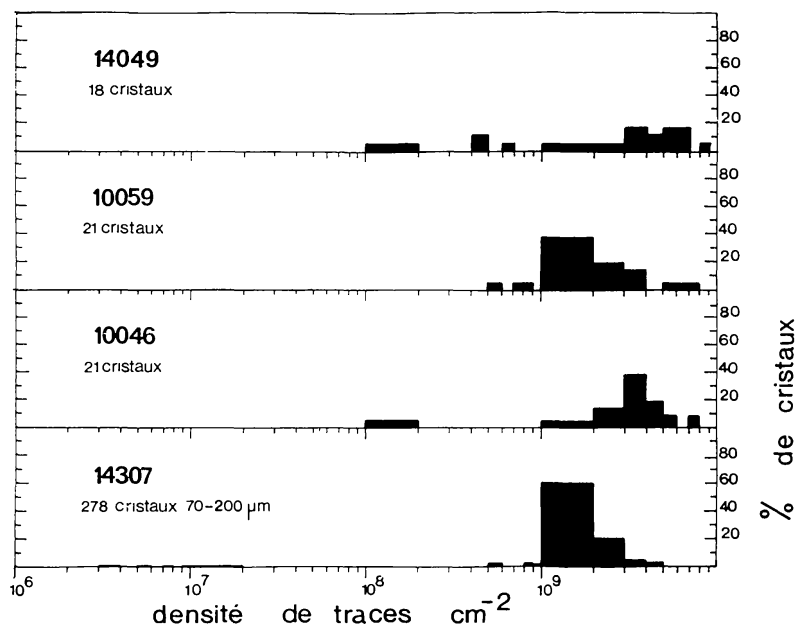


Fig. 12. Histogrammes normalisés de distribution des densités de traces dans les cristaux de quatre brèches lunaires riches en gaz solaires. Les densités de traces de la brèche 14307 correspondent à des densités *minimales* (cf. texte 5.2.) Les brèches 10046, 10059 et 14049 ont été étudiées par Dran *et al.* (1972).

tribution de densités de traces que les 139 CRT étudiés au MEB (cf. 4.2.4.a). En dépit des différents critères de comptages utilisés par les deux groupes, il est manifeste que les CRT de ces brèches sont caractérisés par de très fortes densités de traces, et que les abondances de CRT sont très élevées (ils représentent 95–100% des cristaux étudiés).

### 5.3. CARACTÉRISTIQUES D'IRRADIATION DES CRT

Le fait que  $\sim 95\%$  des cristaux étudiés (70–200  $\mu\text{m}$ ) de la brèche 14307 présentent des densités minimales de traces supérieures à  $10^9 \text{ cm}^{-2}$  ainsi que des valeurs très faibles pour les gradients de densité de traces constitue un problème que l'on retrouve d'ailleurs pour toutes les brèches lunaires, riches en gaz solaires, étudiées jusqu'à présent.

En ce qui concerne les densités de traces des CRT il semble difficile, compte tenu du flux actuel du RCS dont la composante lourde a été déterminée récemment (Crozaz et Walker, 1971; Fleischer *et al.*, 1971b; Price *et al.*, 1971), de les produire dans le régolithe à partir de cristaux non-irradiés. En cas contraire, les temps de résidence en surface des CRT seraient prohibitifs. On calcule qu'il faudrait en effet pour observer une densité de traces de  $2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  au centre d'un cristal de 100  $\mu\text{m}$  de diamètre,  $7 \times 10^5$  ans, avec un taux d'érosion nul, et  $15 \times 10^6$  ans dans le cas, plus réaliste semble-t-il, d'un taux d'érosion de  $\sim 1 \text{ \AA}$  par an.

Dans le cas idéal d'un régolithe à taux de recouvrement constant on calcule aisément, à partir de la valeur minimale de ce taux ( $> 7 \times 10^{-8} \text{ g cm}^{-2} \text{ an}^{-1}$ ) extraite par Russ III *et al.* (1972) pour la couche superficielle de la carotte d'Apollo 15, que la densité

de traces au centre d'un cristal de  $100\ \mu\text{m}$  de diamètre (placé initialement à la surface à l'état non irradié) ne dépasserait pas une valeur limite de  $\sim 5 \times 10^8\ \text{cm}^{-2}$ .

Il est évident que la dynamique des sols fossiles doit s'écarter très sensiblement des cas idéaux traités ci-dessus. Cependant même la prise en considération du taux et de la profondeur de brassage d'un sol ne modifie pas sensiblement le problème, en ce sens que la valeur médiane de la densité de traces dans les cristaux de ces sols remués ne dépasse pas des valeurs limites de l'ordre de  $10^8\ \text{cm}^{-2}$  (Comstock *et al.*, 1972).

Il apparaît donc difficile, à moins d'invoquer des taux de recouvrement encore plus faibles, d'expliquer la production au sein du régolithe des très fortes densités de traces observées dans les CRT des brèches. On sait pourtant que des cristaux exposés à la surface des roches lunaires présentent des densités de traces très élevées. Ainsi Crozaz *et al.* (1970) ont mesuré dans la roche 10017 des densités de l'ordre de  $0,5 \times 10^9\ \text{cm}^{-2}$  à  $100\ \mu\text{m}$  de profondeur dans un feldspath. Mais il faudrait admettre alors que tous les cristaux des sols fossilisés des brèches aient résulté de l'écaillage, sur une profondeur favorable, des cristaux d'abord exposés à la surface des roches. A ce point du raisonnement, il nous apparaît peu probable que les 95% de CRT des brèches puissent avoir été produits par les deux mécanismes ci-dessus, c'est-à-dire un taux de recouvrement extrêmement faible et l'écaillage préférentiel des cristaux exposés à la surface des roches.

En ce qui concerne la faible valeur des gradients de densité de traces observés dans les cristaux de la brèche, une nouvelle difficulté apparaît. Par exemple, le profil le plus pentu observé dans nos 139 cristaux étudiés au MEB (une variation d'un facteur 2 sur une distance de  $15\ \mu\text{m}$ ) pourrait s'exprimer par la relation  $\varrho \propto D^{-0.5}$ , où  $\varrho$  correspond à la densité de traces et  $D$  à la profondeur dans le cristal. Ceci est à comparer d'une part avec le profil observé dans la lentille de verre de Surveyor 3 ( $\varrho \propto D^{-2.6}$ ) mesuré par Fleischer *et al.* (1971b), et d'autre part avec les profils ( $\varrho \propto D^{-1.1 \pm 0.4}$ ) généralement observés dans des cristaux de sols tels qu'ils ont été rapportés récemment par Hart *et al.* (1972). Peut-être des profils aussi plats que ceux observés dans nos cristaux pourraient-ils être attribués aux conditions expérimentales que nous avons utilisées. Nous avons discuté cette éventualité et la pensons peu probable (cf. 4.2.4.c). En fait, deux facteurs peuvent intervenir pour modifier le profil d'atténuation typique des ions VH du RCS tel qu'on l'observe dans le verre de Surveyor: (i) l'effet de l'érosion; (ii) l'enregistrement des ions VH solaires sous une certaine épaisseur de matière.

L'effet de l'érosion à l'équilibre comme Fleischer *et al.* (1971b) l'ont montré, se bornant à diminuer d'une unité l'exposant de la loi en puissance, ce paramètre ne peut-être le seul à intervenir pour expliquer les profils très peu pentus observés dans les cristaux de la brèche. Quant à la possibilité d'enregistrer des ions VH solaires sous une certaine épaisseur de matière qui rendrait compte des profils observés, elle suscite une difficulté majeure car elle exigerait des temps de résidence considérablement supérieurs à ceux que nous avons calculés dans les cas idéaux au début de ce chapitre.

D'autre part une fraction de cristaux de la brèche a dû se trouver exposée directement à la surface puisque les concentrations en gaz solaires dans les brèches sont à



peu près inversement proportionnelles aux dimensions des grains (cf. par exemple Hintenberger *et al.*, 1971; Eberhardt *et al.*, 1972). Nous aurions donc dû trouver au moins *un* cristal dans la brèche avec un profil d'atténuation des ions VH en fonction de la profondeur qui, compte tenu de l'effet d'érosion, aurait pu être attribué aux caractéristiques du RCS tel que nous le connaissons aujourd'hui. En fait, de quelque côté qu'on prenne le problème, on se trouve devant des incompatibilités si on adopte les caractéristiques du flux RCS actuel, pour expliquer l'état d'irradiation des CRT de la brèche.

On est donc amené à s'interroger sur la constance des caractéristiques moyennes du RCS pour rendre compte des densités de traces dans les CRT.

Les mesures du cosmonuclide  $^{26}\text{Al}$  dans les parties superficielles de roches lunaires (Finkel *et al.*, 1971; Tanaka *et al.*, 1972) ont montré que le flux et la forme du spectre des protons solaires n'étaient pas essentiellement différents pour les deux derniers millions d'années, de leur valeur moyenne pendant les derniers cycles solaires. Pour être interprétés correctement les résultats obtenus à partir du  $^{53}\text{Mn}$  requièrent une connaissance, qui fait défaut, aussi bien des pertes de matière superficielle par attrition que des taux d'érosion. Cependant on ne peut pas exclure, d'après les résultats de Finkel *et al.* (1971), que les caractéristiques moyennes du RCS pendant les dix derniers millions d'années étaient quelque peu différentes (valeurs plus faibles de l'indice spectral. Récemment Fields *et al.* (1972), pour expliquer la valeur très élevée du rapport  $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$  et l'abondance en  $^{237}\text{Np}$  mesurées dans le sol 12070, ont invoqué un flux moyen de protons solaires beaucoup plus important il y a 2–100 millions d'années. Ce flux serait près de  $100 \times$  plus intense ( $E_p > 10 \text{ MeV}$ ) que celui obtenu à partir de  $^{26}\text{Al}$ .

Nos résultats expérimentaux pourraient être expliqués en postulant une intensité de flux de  $10\text{--}200 \times$  la valeur actuelle et un spectre en énergie dont l'aplatissement pour des ions de  $R < 0.3 \text{ GV}$  pourrait être dû à des dégradations d'énergie résultant, soit de la propagation dans un vent solaire plus fort selon le mécanisme de Parker (1965), soit d'un temps de confinement plus long au voisinage du soleil qui correspondrait à un parcours d'environ  $0,4 \text{ mg cm}^{-2}$  d'hydrogène ionisé soit encore de l'existence d'une atmosphère ou magnétosphère lunaires non négligeables. Dans les évaluations ci-dessus nous avons utilisé le modèle de Comstock *et al.* (1971) pour dériver la valeur plus élevée de l'intensité de flux requis, ainsi que les taux de perte d'énergie dans l'hydrogène ionisé de Hayakawa et Kitao (1956), modifiés pour les ions de fer, dans le calcul de la quantité de matière traversée.

Les postulats ci-dessus sont certainement discutables. Tout autre modèle doit cependant rendre compte de l'existence d'un pourcentage très élevé de cristaux à très fortes densités de traces dans un sol fossilisé où les concentrations en isotopes stables spallogéniques sont relativement faibles.

Peut-on apporter des précisions quant à l'époque où cette activité solaire beaucoup plus forte se serait manifestée? Rien de sûr ne peut être avancé à ce propos.

Les arguments pétrographiques, par exemple, sont ambigus. Si Warner (1972) considère que la série métamorphique, représentée dans les brèches d'Apollo 14, a été

produite par l'impact qui a donné naissance au Mare Imbrium (il y a  $\sim 3.8 \times 10^9$  an), il n'élimine toutefois pas la possibilité que les brèches riches en gaz solaires et pétrographiquement 'non équilibrées', comme la brèche 14307, puissent être de formation beaucoup plus tardive.

Les méthodes de chronologie classiques les plus précises (Rb-Sr,  $^{39}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}$ ) ne peuvent pas nous fournir la date du stade de bréchification qui a formé l'objet 14307 tel que nous le connaissons aujourd'hui. Si des brèches plus métamorphiques du site Apollo 14 ont fourni des datations comprises entre  $\sim 3,85$  et  $\sim 3,95 \times 10^9$  an (Wasserburg et Papanastassiou, 1971) ces datations peuvent ne pas s'appliquer à l'objet 14307 qui – à la limite – aurait pu être aggloméré par un impact à une époque très récente. Cette dernière possibilité se heurte pourtant au fait, nous l'avons vu, que les sols d'Apollo 14 présentent des distributions de densités minimales de traces dans les CRT qui apparaissent différentes de celles observées dans les cristaux de la brèche. Mais jusqu'ici le régolithe du site Apollo 14 n'a été étudié que sur quelques dizaines de centimètres de profondeur: il n'est donc pas exclu qu'à de plus grandes profondeurs des couches de régolithe puissent présenter les mêmes caractéristiques d'irradiation que celles observées dans les cristaux de la brèche.

La présence d'une composante de xénon de fission dans la brèche 14307, qui pourrait être attribuée à la fission spontanée de  $^{244}\text{Pu}$ , a été signalée par Bogard et Nyquist (1972). Cette composante due au  $^{244}\text{Pu}$  a été extraite dans les brèches un peu plus métamorphiques 14301 (Drodz *et al.*, 1972) et 14318 (Srinivasan *et al.*, 1972). Mais les derniers auteurs ont pu montrer que cette composante de xénon lourd de fission avait été mobilisée et déplacée de ses sites réticulaires originels. De plus, la présence d'une composante analogue de xénon lourd a été signalée aussi par Bogard et Nyquist (1972) dans la fraction 1–2 mm du sol 14162. Ici encore, puisqu'il s'agit d'un sol, on ne peut éviter l'ambiguïté dans l'interprétation des résultats si on voulait extraire, de cette donnée, une information sûre en ce qui concerne la date où l'objet 14307 a été formé en tant que brèche.

Tout au plus, en comparant la fréquence des brèches riches en gaz dans les différents sites visités, peut-on remarquer que celle-ci s'élève à  $\sim 40\%$  au site Apollo 14 (daté à  $3,85\text{--}3,95 \times 10^9$  ans), à  $50\%$  au site Apollo 11 ( $3,6\text{--}3,7 \times 10^9$  ans) et à  $\sim 4\%$  au site Apollo 12 ( $3,15\text{--}3,30 \times 10^9$  ans). Les datations ci-dessus sont celles obtenues par le groupe du Caltech (Wasserburg et Papanastassiou, 1971, et références incluses). Si les abondances variables des brèches riches en gaz dans les différents sites sont en rapport avec les taux d'impact, on devrait admettre que le taux de formation des brèches a été plus important dans l'intervalle  $\sim 4,0\text{--}3,6 \times 10^9$  ans que depuis  $3,15 \times 10^9$  ans. S'il en était ainsi, les conditions d'irradiation très particulières par le RCS observées dans les CRT de la brèche se rapporteraient à des temps antérieurs à  $3,6 \times 10^9$  ans.

### Remerciements

Nous voudrions à l'occasion de cet article, écrit en l'honneur du 80ème anniversaire du Prof. Harold C. Urey, le remercier pour l'exemple qu'il nous a donné tout au long

d'une vie scientifique de niveau exceptionnel. De son exemple nous avons retenu, entre autres, une magnifique leçon de probité intellectuelle. Pendant de nombreuses années encore, nous espérons voir le Prof. H. C. Urey animer activement ce domaine de recherche assez inextricable que constitue l'étude des matériaux extra-terrestres.

Nous remercions aussi la National Aeronautics and Space Administration pour avoir accepté de nous confier, pour étude, des échantillons ramenés par les missions Apollo 14 et Apollo 15, ainsi que l'Académie des Sciences d'U.R.S.S. qui a mis à la disposition du Consortium français les échantillons ramenés par les sondes Luna 16 et Luna 20.

Ce travail a été rendu possible grâce à l'aide du Prof. R. Lafitte du Laboratoire de Géologie du Muséum, et du Prof. J. Fabries qui nous ont accordé leurs encouragements constants. Notre gratitude va aussi à Me D. Michel, M. J. P. Bossy et M. A. Ducatel pour leur assistance technique très appréciée.

Ce travail a été effectué avec l'aide du Centre national de la Recherche scientifique et du Centre national d'Études spatiales, et grâce au contrat NF 2.589.71 de la Swiss National Science Foundation.

### Bibliographie

- Arrhenius, G., Liang, S., Macdougall, D., Wilkening, L., Bhandari, N., Bhat, S., Lal, D., Rajagopalan, G., Tamhane, A. S., et Venkatavaradan, V. S.: 1971, *Proc. 2nd Lunar Sci. Conf.* 3, 2583.
- Berdot, J. L., Chétrit, G. C., Lorin, J. C., Pellas, P., et Poupeau, G.: 1972a, dans J. W. Chamberlain et C. Watkins (eds.), *Apollo 15 Lunar Samples*, 333–335, Lunar Science Institute.
- Berdot, J. L., Chétrit, G. C., Lorin, J. C., Pellas, P., et Poupeau, G.: 1972b, *Proc. 3rd Lunar Sci. Conf.* 3, 2867.
- Bogard, D. D., Funkhouser, J. G., Schaeffer, O. A., et Zähringer, J.: 1971, *J. Geophys. Res.* 76, 833.
- Bogard, D. D. et Nyquist, L.: 1972, *Proc. 3rd Lunar Sci. Conf.* 2, 1797.
- Carter, N. L., Leung, I. S., Ave'Lallemant, H. G., et Fernandez, L. A.: 1970, *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.* 1, 267.
- Chao, E. C. T., James O. B., Minkin, J. A., Boreman, J. A., Jackson, E. D., et Raleigh, C. B.: 1970, *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.* 1, 287.
- Comstock, G. M., Evwaraye, A. O., Fleischer, R. L., et Hart, H. R.: 1971, *Proc. 2nd Lunar Sci. Conf.* 3, 2569.
- Crozaz, G., Hair, M., Maurette, M., et Walker, R.: 1969, *Proc. Intern. Conf. Nuclear Track Registr. Insulating Solids, Clermont-Ferrand, I*, VII, 41.
- Crozaz, G., Haack, U., Hair, M., Maurette, M., Walker, R., et Woolum, D.: 1970, *Proc. 1st Lunar Sci. Conf.* 3, 2051.
- Crozaz, G. et Walker, R.: 1971, *Science* 171, 1237.
- Dran, J. C., Duraud, J. P., Maurette, M., Durrieu, L., Jouret, C., Legressus, C.: 1972, dans C. Watkins (ed.), *Lunar Science III*, 183–185, Lunar Sci. Inst., Contrib. No. 88.
- Drodz, R., Hohenberg, C. M., et Ragan, D.: 1972, *Earth Planetary Sci. Letters* 15, 338.
- Eberhardt, P., Geiss, J., Graf, H., Grögler, N., Krähenbühl, U., Schwaller, H., Schwarzmüller, J., et Settler, A.: 1970, *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.* 2, 1037.
- Eberhardt, P., Geiss, J., et Graf, H.: 1971, *Earth Planetary Sci. Letters* 12, 260.
- Eberhardt, P., Geiss, J., Graf, H., Grögler, N., Mendia, M. D., Mörgeli, M., Schwaller, H., et Stettler, A.: 1972a, *Proc. 3rd Lunar Sci. Conf.* 2, 1821.
- Eberhardt, P., Geiss, J., Graf, H., Grögler, N., Krähenbühl, U., Schwaller, H., et Stettler, A.: 1972b, *Geochim. Cosmochim. Acta*, sous presse.
- Fields, P. R., Diamond, H., Metta, D. N., et Rokop, D. J.: 1972, dans J. W. Chamberlain et C. Watkins (eds.), *Apollo 15 Lunar samples*, 360–363, Lunar Science Institute.
- Finkel, R. C., Arnold, J. R., Imamura, M., Reedy, R. C., Fruchter, J. S., Loosli, H. H., Evans, J. C.,

- et Delany, A. C.: 1971, *Proc. 2nd Lunar Sci. Conf.* **2**, 1773.
- Fleischer, R. L., Hart, H. R., Comstock, G. M., et Evwaraye, A. O.: 1971a, *Proc. 2nd Lunar Sci. Conf.* **3**, 2559.
- Fleischer, R. L., Hart, H. R., et Comstock, G. M.: 1971b, *Science* **171**, 1240.
- Fuchs, L. H.: 1970, *Science* **169**, 866.
- Funkhousen, J. G., Schaeffer, O. A., Bogard, D. D., et Zähringer, J.: 1971, dans Max-Planck-Institut für Kernphysik (ed.), *Zähringer's Memorial Volume*, Heidelberg, p. 792.
- Hart, H. R., Comstock, G. M., et Fleischer, R. L.: 1972, *Proc. 3rd Lunar Sci. Conf.*, **3**, 2831.
- Hayakawa, S. et Kitao, K.: 1956, *Progr. Theor. Phys.* **16**, 139.
- Hintenberger, H., Weber, H. W., et Takaoka, N.: 1971, *Proc. 2nd Lunar Sci. Conf.* **2**, 1607.
- Hubbard, N. J. et Gast, P. W.: 1971, *Proc. 2nd Lunar Sci. Conf.* **2**, 999.
- Hubbard, N. J., Gast, P. W., Rhodes, M., et Wiesmann, H.: 1972, dans C. Watkins (ed.), *Lunar Science III*, 407–409, Lunar Sci. Inst., Contrib. No. 88.
- Huneke, J. C., Podosek, F. A., Burnett, D. S., et Wasserburg, G. J.: 1972, *Geochim. Cosmochim. Acta* **36**, 269.
- Hutcheon, I. D., Phakey, P. P., et Price, P. B.: 1972, *Proc. 3rd Lunar Sci. Conf.* **3**, 2845.
- Jackson, E. D. and Wilshire, H. J.: 1972, dans C. Watkins (ed.), *Lunar Science III*, 418–420, Lunar Sci. Inst., Contrib. No. 88.
- Kaiser, W. A. et Berman, B. L.: 1972, *Earth Planetary Sci. Letters* **15**, 320.
- Kirsten, T., Deubner, J., Horm, P., Kaneoka, I., Kiko, J., Schaeffer, O. A., et Thio, S. K.: 1972, *Proc. 3rd Lunar Sci. Conf.* **2**, 1865.
- Lal, D., Lorin, J. C., Pellas, P., Rajan, R. S., et Tamhane, A. S.: 1969, dans P. M. Millman (ed.), *Meteorite Research*, IAEA, Vienna.
- Lanzerotti, L. J., MacLennan, C. G., et Graedel, T. E.: 1972, *Astrophys. J. Letters* **173**, L39.
- Marti, K., Lugmair, G. W., et Urey, H. C.: 1970, *Proc. Apollo 11 Sci. Conf.* **2**, 1357.
- Mogro-Campero, A. et Simpson, J. A.: 1971, *Astrophys. J. Letters* **171**, L5.
- Nyquist, L., Kunk, H., Schultz, L., et Signer, P.: 1972, *Geochim. Cosmochim. Acta*, sous presse.
- Parker, E. N.: 1965, *Planetary Space Sci.* **13**, 7.
- Phakey, P. P., Hutcheon, I. D., Rajan, R. S., et Price, P. B.: 1972, dans C. Watkins (ed.), *Lunar Science III* 608–610, Lunar Sci. Inst., Contrib. No. 88.
- Poupeau, G. et Berdot, J. L.: 1972, *Earth Planetary Sci. Letters* **14**, 381.
- Poupeau, G., Chétrit, G. C., Berdot, J. L., et Pellas, P.: 1972, *Geochim. Cosmochim. Acta*, sous presse.
- Price, P. B., Hutcheon, I., Cowsik, R., et Barber, D. J.: 1971, *Phys. Rev. Letters* **26**, 916.
- Quaide, W. et Bunch, T.: 1970, *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.* **1**, 711.
- Russ III, G., Burnett, D. S., et Wasserburg, G. J.: 1972, *Earth Planetary Sci. Letters* **15**, 172.
- Srinivasan, B., Alexander, E. C., Davis, P. K., et Reynolds, J. H.: 1972, *EOS* **53**, 1038.
- Tanaka, S., Sakamoto, K., et Komura, K.: 1972, *J. Geophys. Res.* **77**, 4281.
- Warner, J. L.: 1972, dans C. Watkins (ed.), *Lunar Science III*, 782–784, Lunar Sci. Inst. Contrib. No. 88.
- Wasserburg, G. J. et Papanastassiou, D. A.: 1971, *Earth Planetary Sci. Letters* **13**, 97.
- Williams, R. J.: 1972, *Earth Planetary Sci. Letters* **16**, 250.