



La composition
isotopique de l'oxygène
du Soleil

Marc Chaussidon
Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques
CRPG-CNRS, UPR 2300
Vandœuvre-Lès Nancy

Pourquoi chercher à connaître la composition isotopique de l'oxygène du Soleil ?

- de grandes "anomalies" de la composition isotopique de l'oxygène sont connues, **mais inexplicées**, dans les météorites
- l'oxygène est un élément majeur des minéraux et des planètes ($\approx 50\%$ des silicates)



Comprendre l'origine de ces variations dans les composants des météorites pourrait permettre de préciser le chemin chimique ou physique entre le gaz et les premiers grains

Composition du gaz de départ

Les 3 isotopes de l'oxygène ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O

$$^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \approx 2 \times 10^{-3}$$

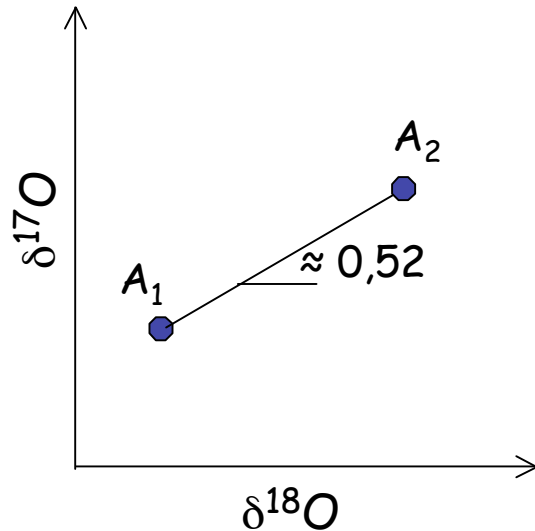
$$^{17}\text{O}/^{16}\text{O} \approx 4 \times 10^{-4}$$

Notation delta :

$$\delta^{17}\text{O} = ((^{17}\text{O}/^{16}\text{O} / ^{17}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{SMOW}}) - 1) \times 1000$$

$$\delta^{18}\text{O} = ((^{18}\text{O}/^{16}\text{O} / ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{SMOW}}) - 1) \times 1000$$

La loi de fractionnement de masse

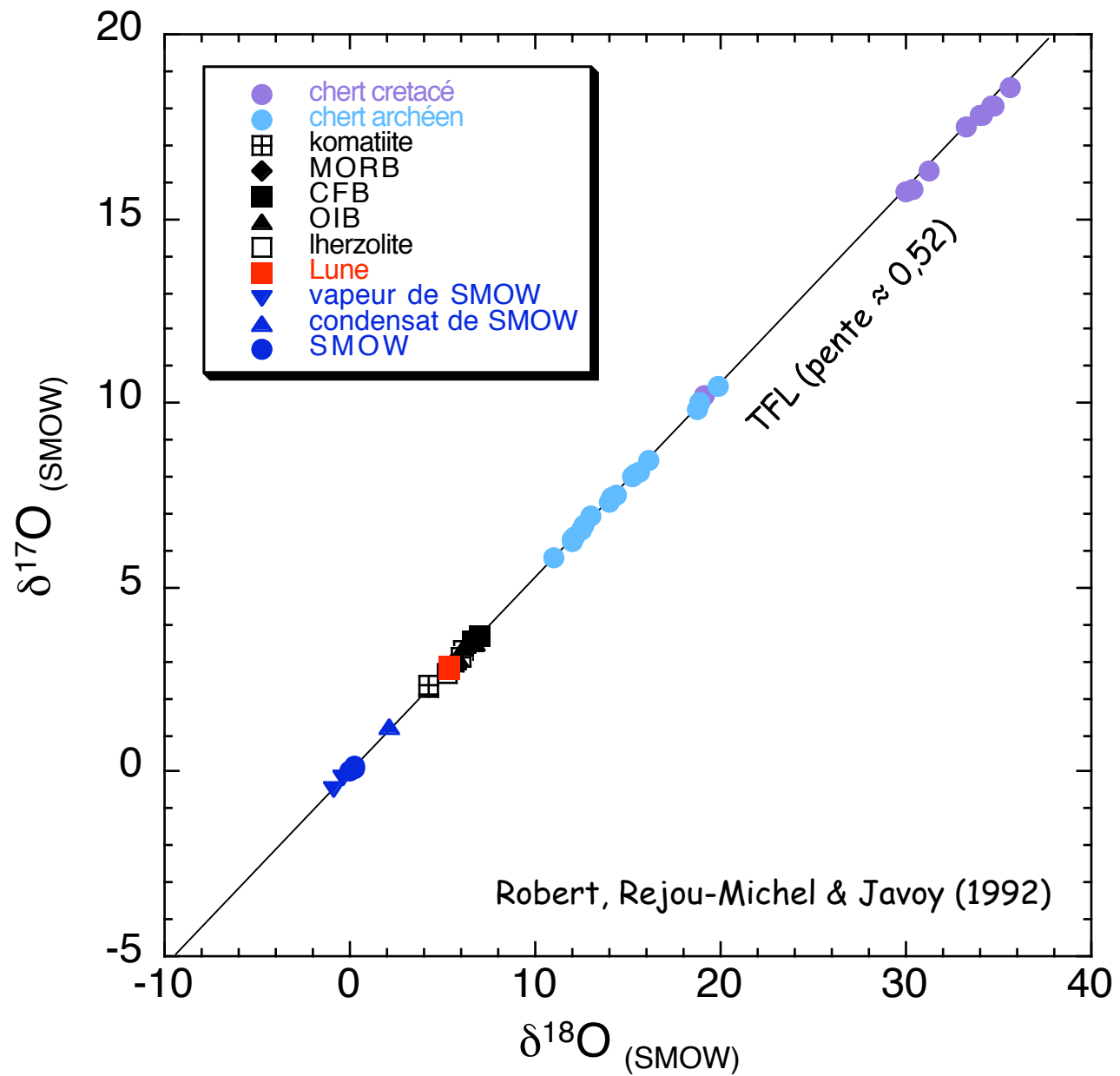


- Si A change de composition isotopique lors d'une réaction chimique, on peut montrer qu'à l'équilibre

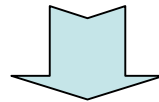
$$\frac{\delta^{17}\text{O}_{A_2} - \delta^{17}\text{O}_{A_1}}{\delta^{18}\text{O}_{A_2} - \delta^{18}\text{O}_{A_1}} \approx \frac{1/m^{16}\text{A} - 1/m^{17}\text{A}}{1/m^{16}\text{A} - 1/m^{18}\text{A}}$$

si A = O	$(1/16 - 1/17)/(1/16 - 1/18) = 0,529$
si A = CO	$(1/28 - 1/29)/(1/29 - 1/30) = 0,517$
si O ₂	0,516
si SiO ₂	0,508

- Même dépendance à la masse lors des fractionnements cinétiques (diffusion)



Tous (presque tous !) les processus ou les réactions chimiques connus (fusion-cristallisation, évaporation-condensation, réaction avec l'eau ou l'oxygène, ...) obéissent à la loi de discrimination de masse.



Tous les oxydes ou silicates formés dans le système solaire devraient avoir une composition isotopique de l'oxygène sur une droite de pente 0,5 passant par la composition du gaz de la nébuleuse

Si

(1) Les compositions isotopiques de l'oxygène avaient été homogénéisées dans la nébuleuse

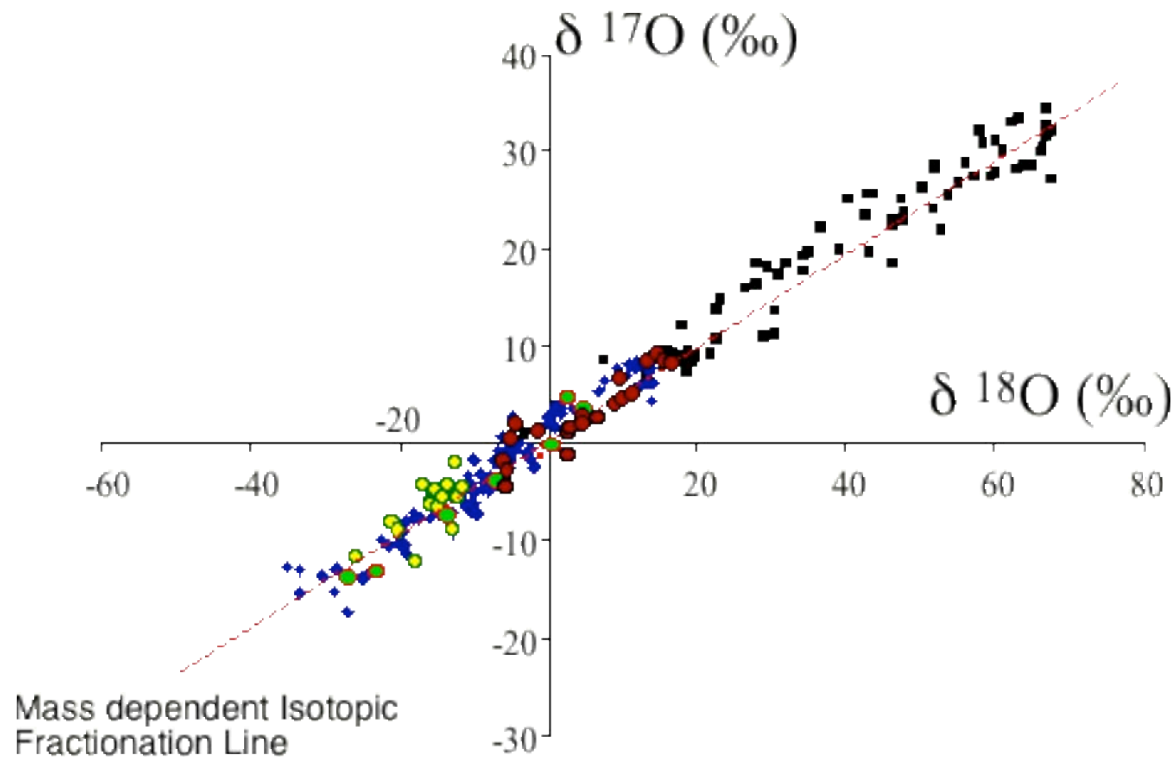
&

(2) Il n'y avait pas d'autres réactions qui ont lieu

Expériences d'évaporation et de condensation (avec réactions dans le gaz)

(Robert & Chaussidon, non publié)

Evaporated Solids	Gas	Pressure	T (condensation)
■ SiO ₂	CO ₂	5 × 10 ⁻³	1400 K
◆ SiO ₂	CO ₂	5 × 10 ⁻¹	1280 K
● SiO ₂	CO ₂	5 × 10 ⁻¹	1200 K
● SiO ₂ + Al	CO ₂	5 × 10 ⁻¹	1270 K
● SiO ₂ + Al	CO ₂	5 × 10 ⁻³	1160 K



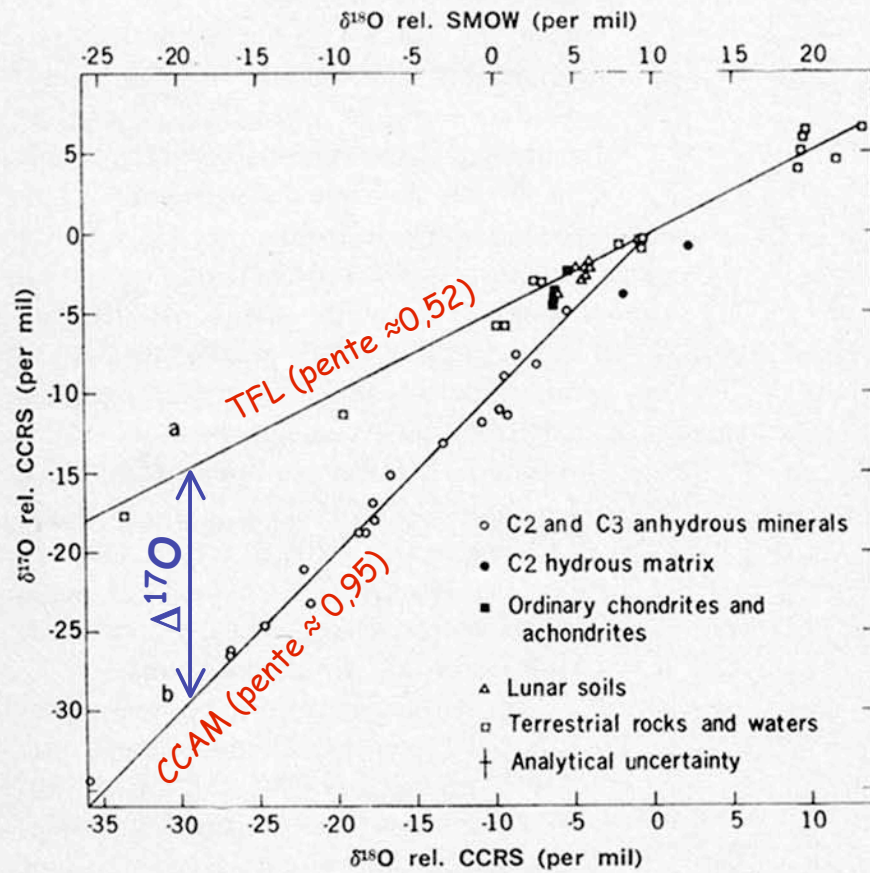
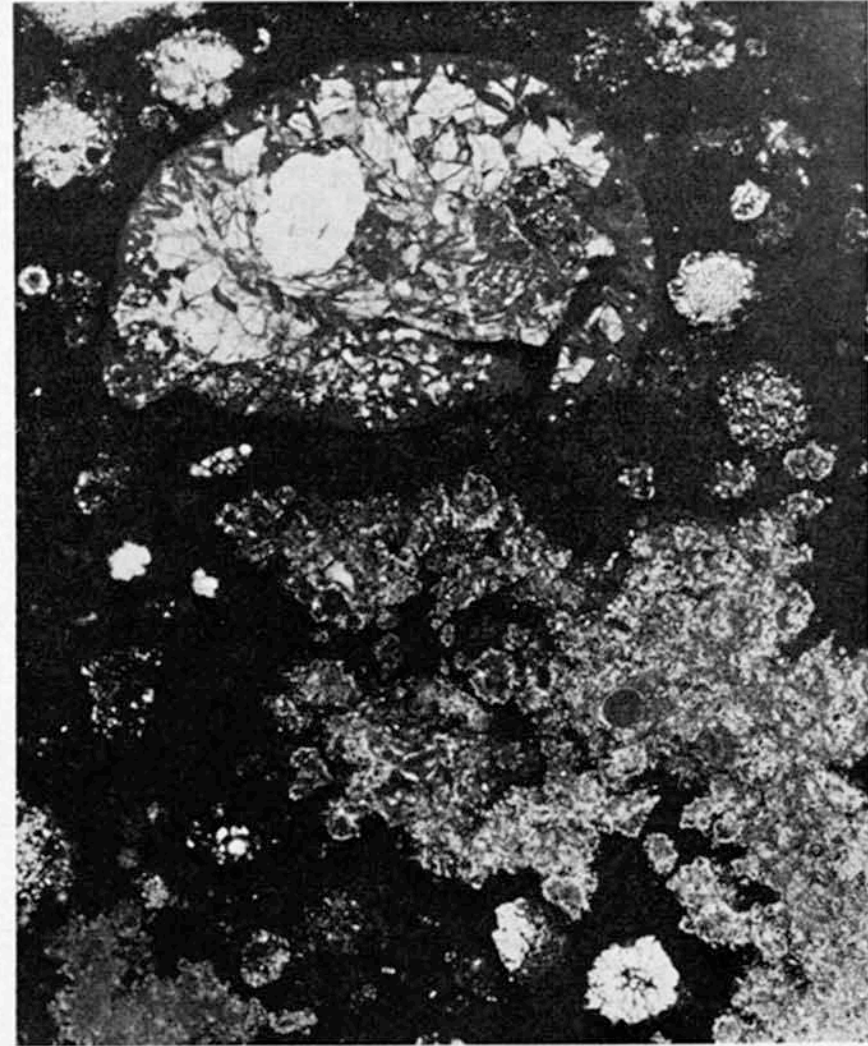
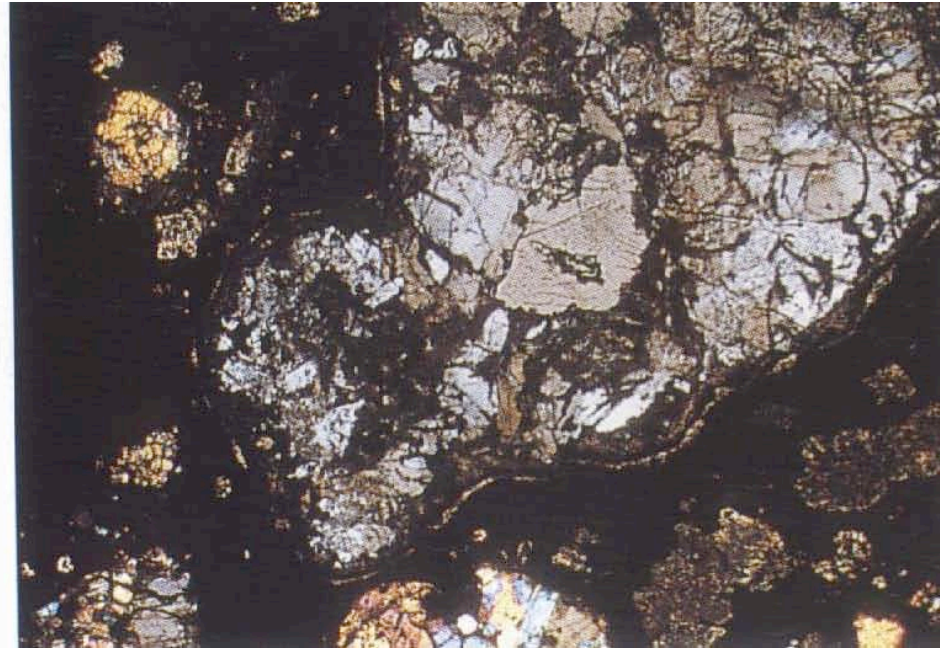
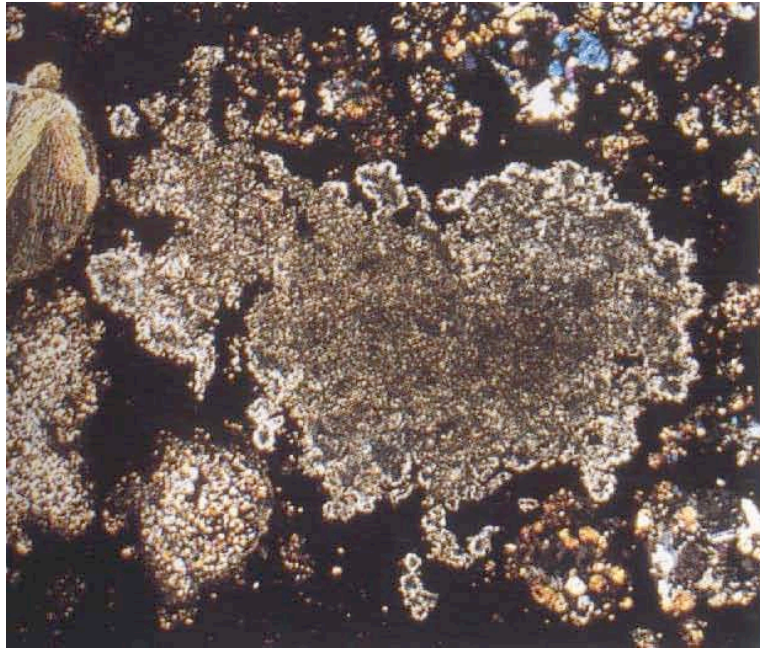


Fig. 1 (left). Relationship between $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ variations and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ variations for terrestrial, lunar, and meteoritic samples. Points lying along line a, with a slope of $+1/2$, define the trend for chemical isotope effects; points lying along line b, with a slope of $+1$, define a mixing line between "normal" oxygen and an ^{18}O -rich component. The points on line b are all from phases in carbonaceous chondrites. The reference standards are SMOW [standard mean ocean water (13)] and CCRS [carbonaceous chondrite reference standard (see text)]. Fig. 2 (right). Photomicrograph of a section of the Allende meteorite, showing two large white inclusions (see text). Area of section, 8 by 10 mm. [Courtesy Richard J. Kjarval, Graphic Arts Facility, Physical Sciences Division, University of Chicago]



Clayton, Grossman & Mayeda (1973)



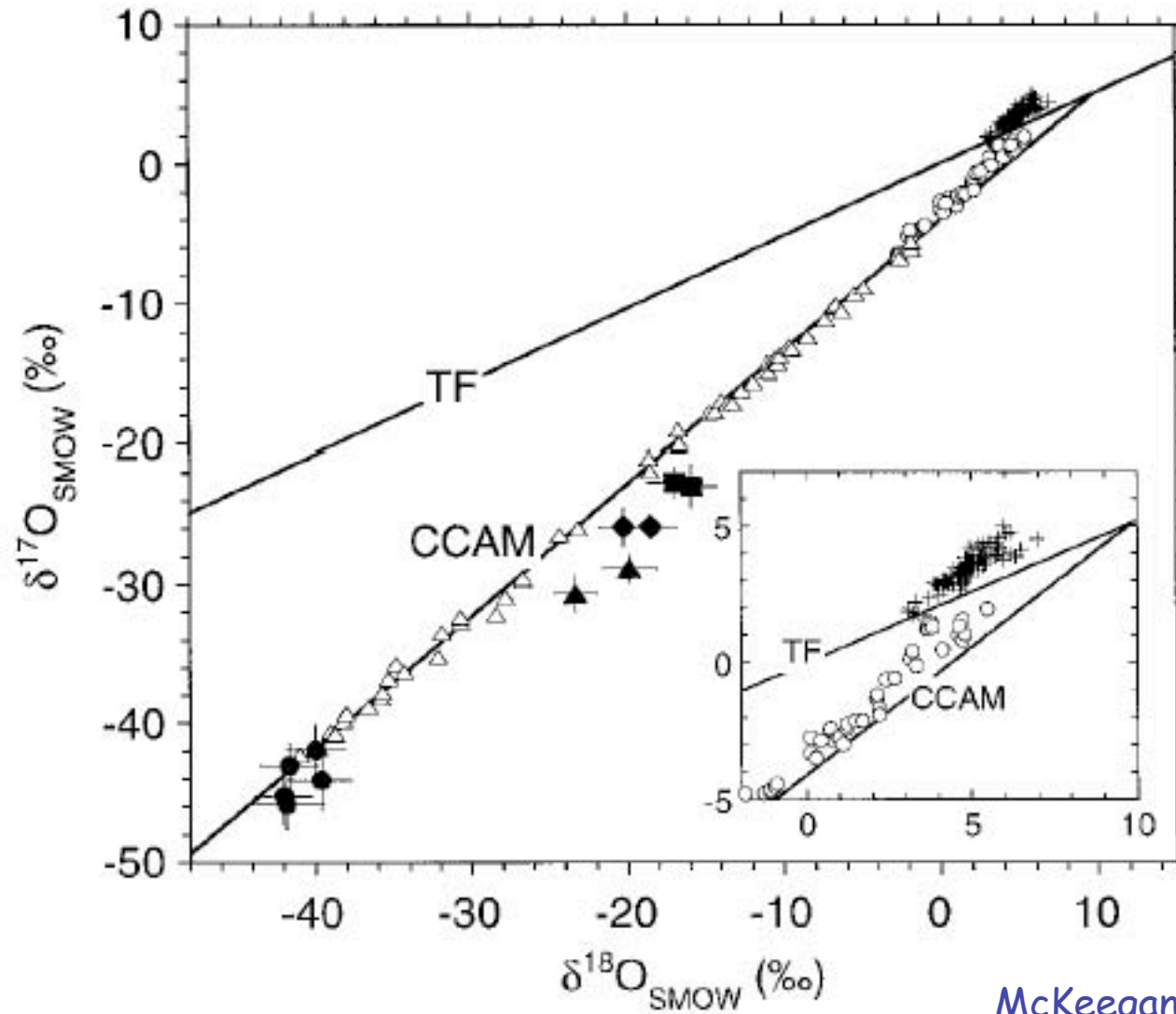
Inclusions réfractaires
riches en Ca et en Al (CAIs)
= composants parmi les plus
primitifs à l'intérieur des
météorites primitives

- composition solaire (pour la plupart des rapports isotopiques)
- composition réfractaire : formés à très haute température (près du Soleil ?)
- âges les plus anciens parmi tous les composants des météorites ($4567,2 \pm 0,6$ Ma)
- les CAIs ont incorporé lors de leur formation des éléments radioactifs à courte période (héritage présolaire & irradiation par le Soleil jeune)

Météorites primitives (chondrites) = CAIs + chondres + matrice

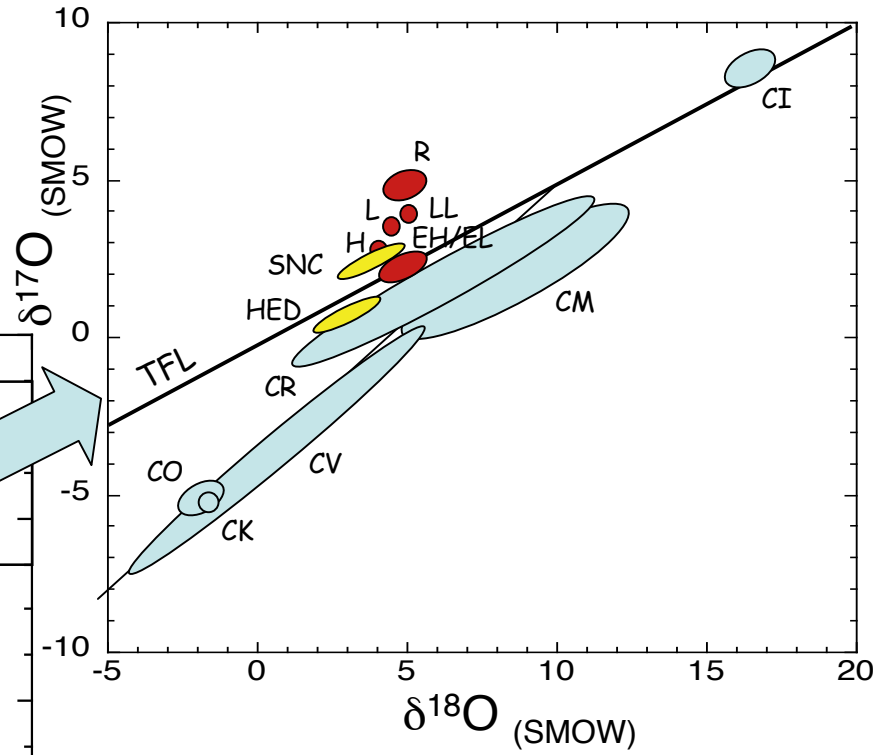
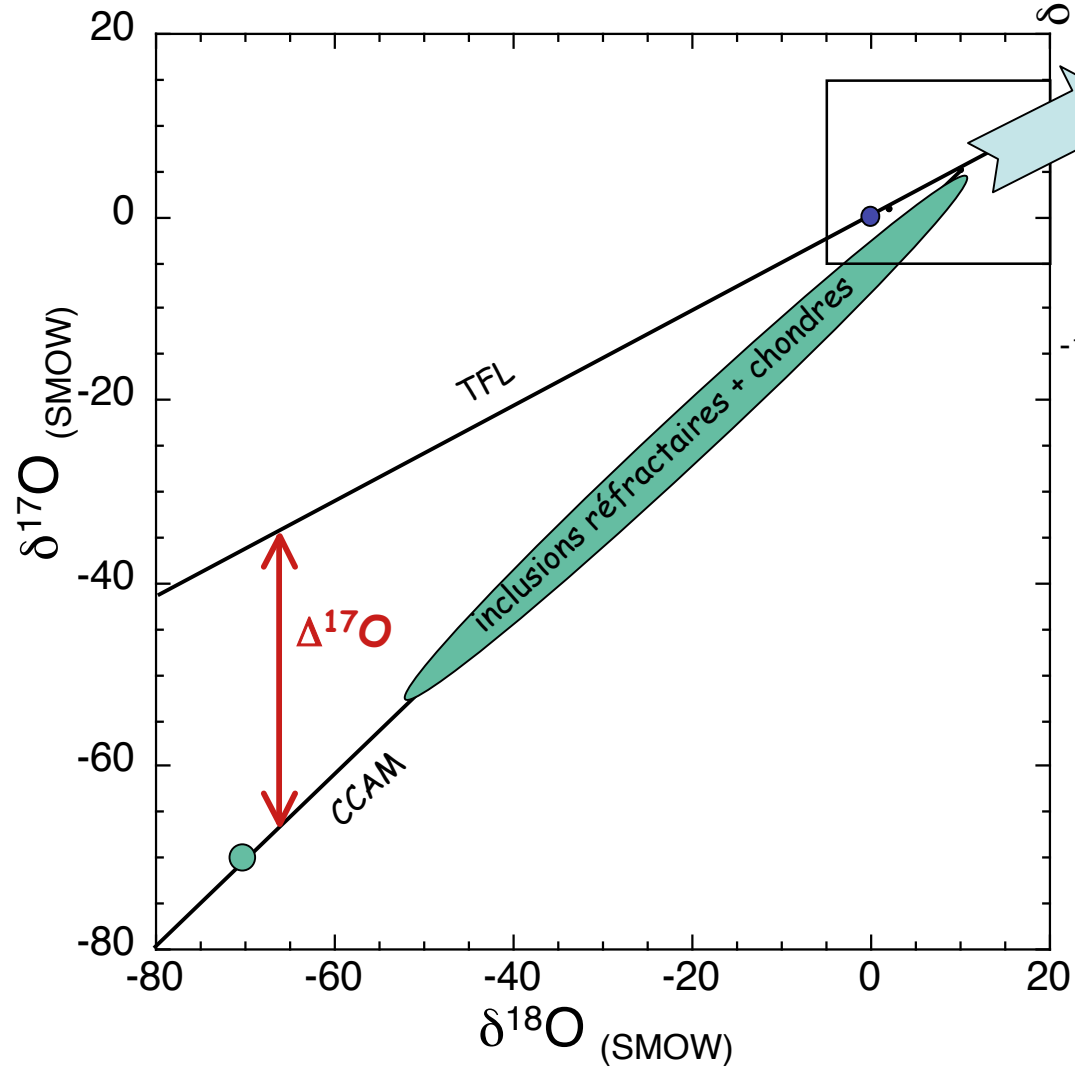


Excès de ^{16}O dans les CAIs et les chondres des chondrites carbonées et des chondrites ordinaires

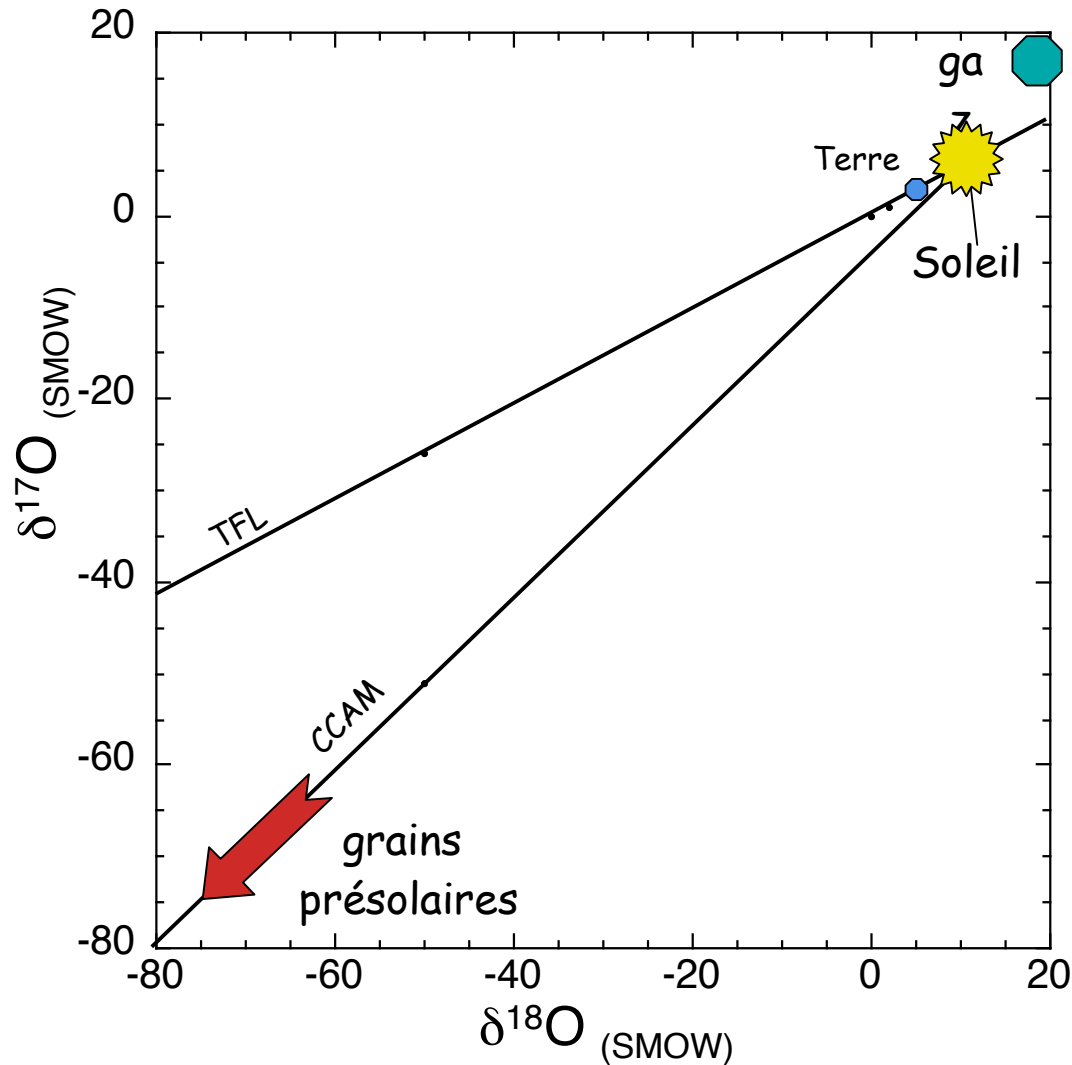


McKeegan et al., 1998

Variations non dépendantes de la masse
dans les chondrites en roche totale
et dans les planètes (Terre & Mars)



Quelle est l'origine de ces variations isotopiques de l'oxygène dans le système solaire ?



(1) Mélange entre deux composants (Clayton et al., 1973) :

- gaz de la nébuleuse (au dessus de la TFL)
- grains présolaires riches en ^{16}O (^{16}O pur e.g. fusion de He ou fusion explosive de ^{12}C)

Conséquences :

- $\approx 4\%$ de grains présolaires
- $\delta^{18}\text{O}$ du gaz $\approx +20\%$ (Clayton & Mayeda 1984)
- composition du Soleil dépend du rapport gaz/grains mais au dessus de TFL.
- autres anomalies ?
- composition particulière des grains présolaires

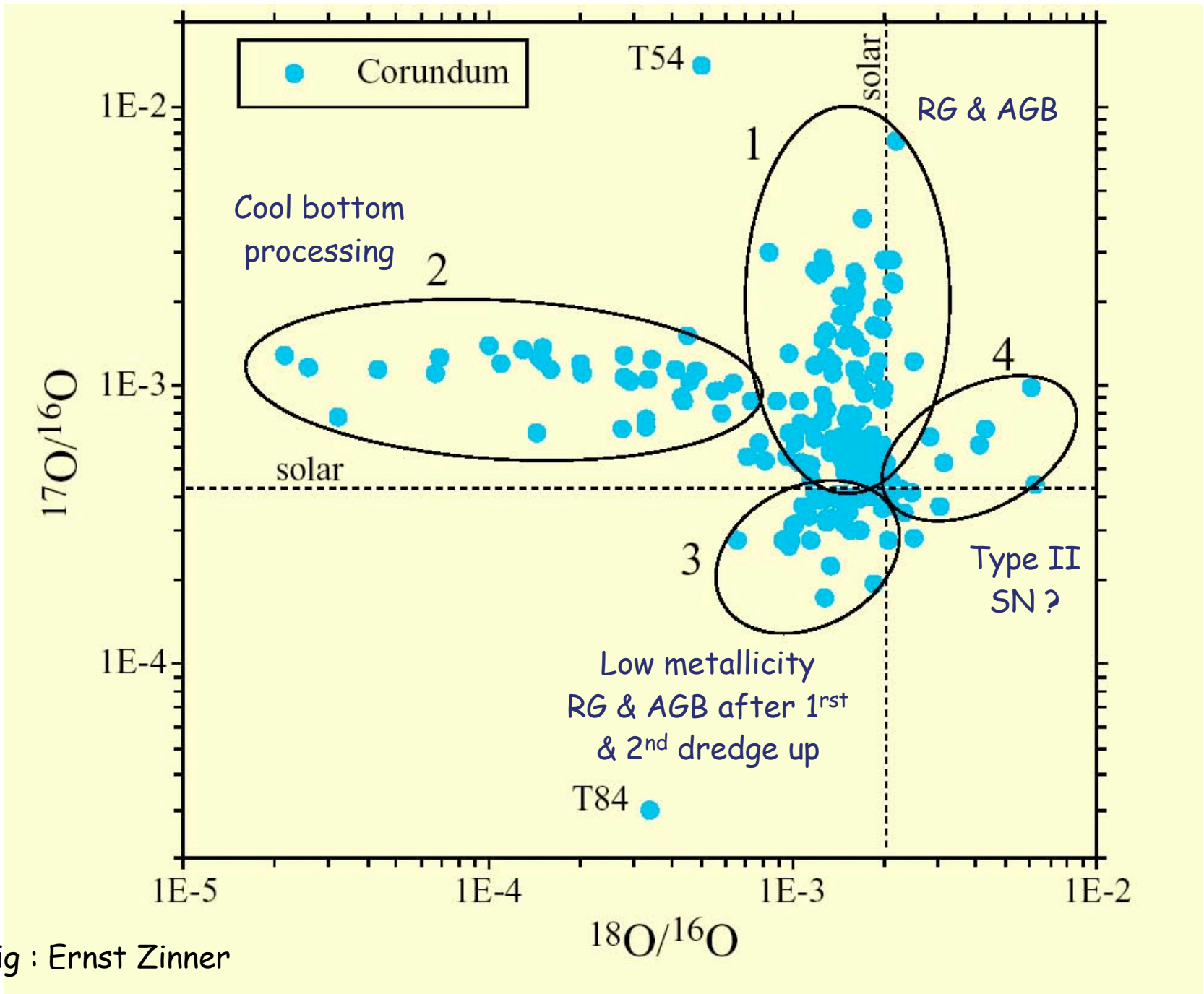
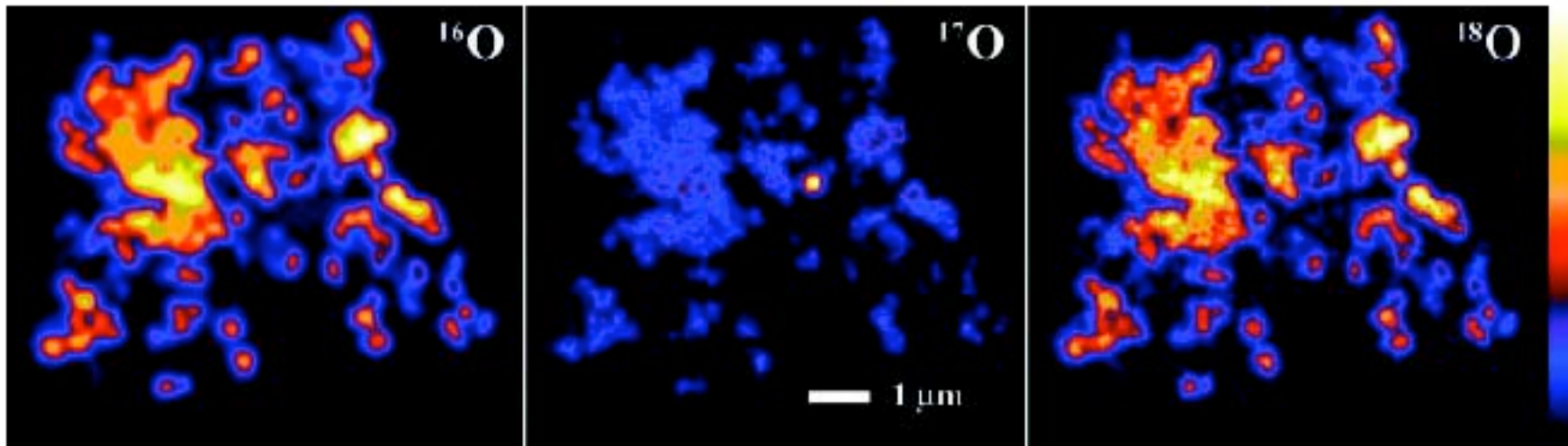
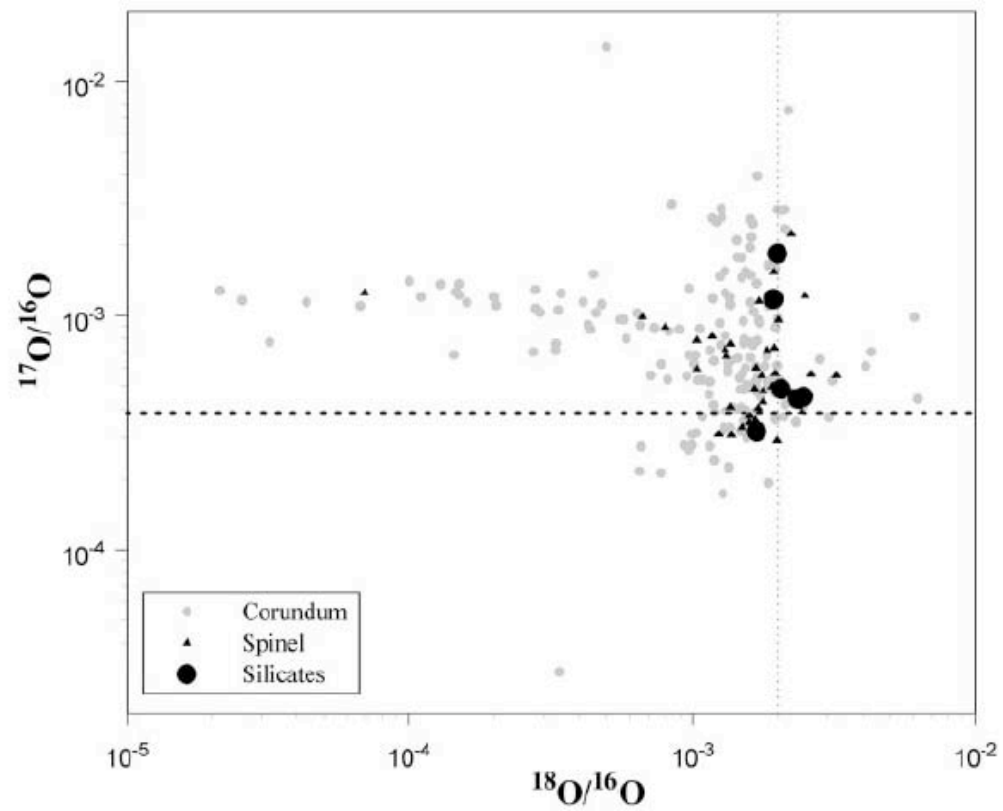


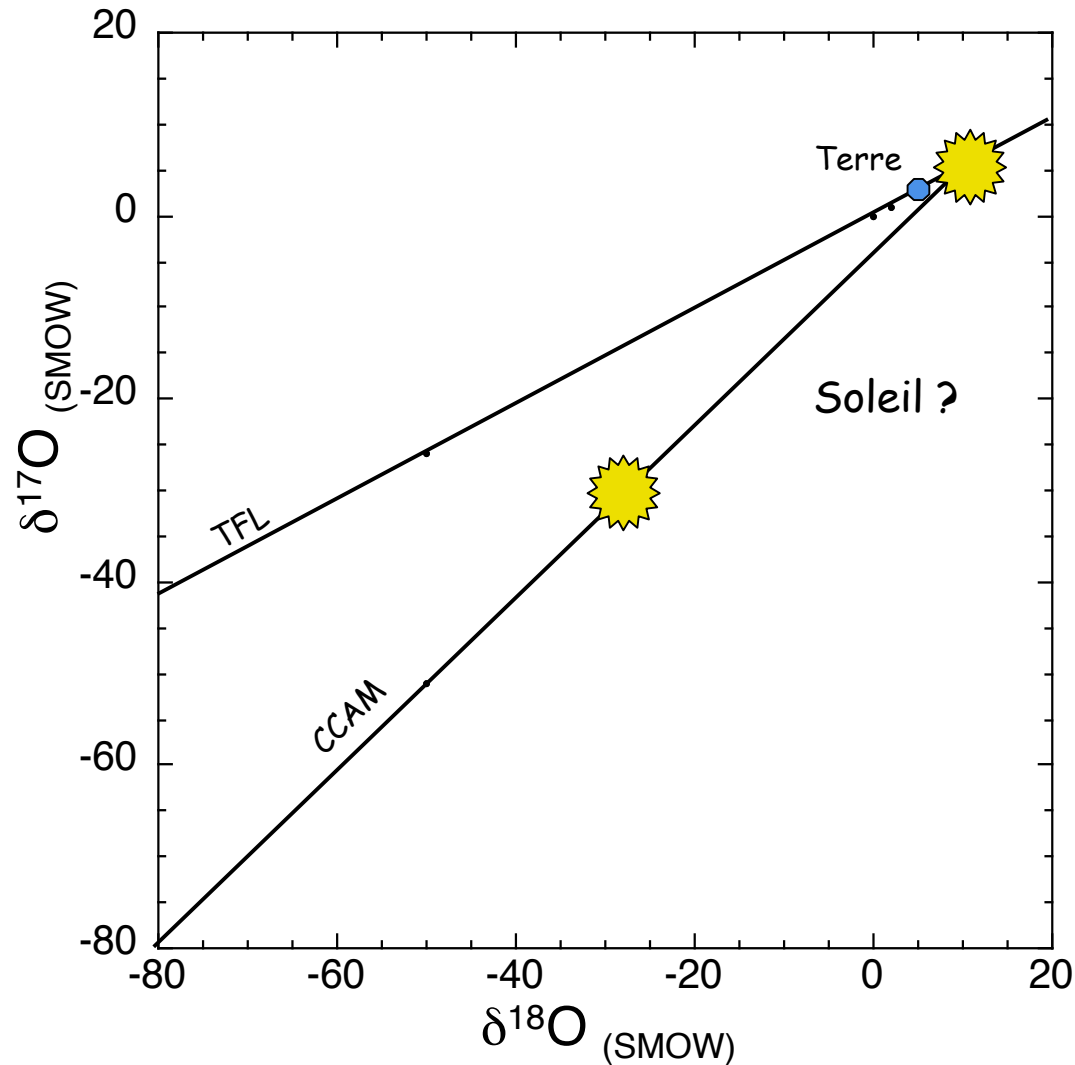
Fig : Ernst Zinner



Messenger et al. (2003)



Quelle est l'origine de ces variations isotopiques de l'oxygène dans le système solaire ?

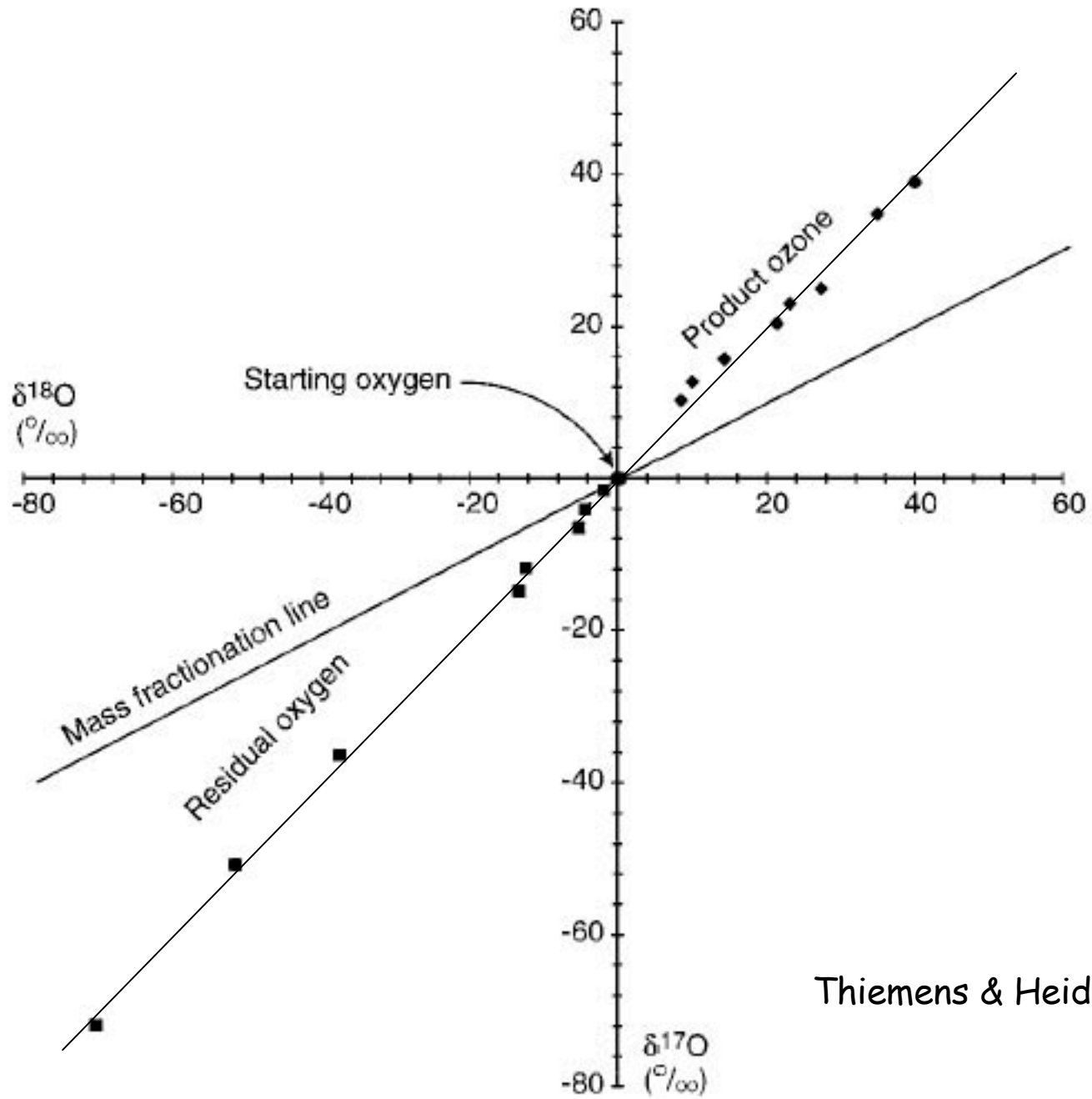


(2) Réactions chimiques avec fractionnements isotopiques indépendants de la masse : (Thiemens & Heidenreich, 1983)

Origine de l'effet isotopique démontré par l'ozone inconnu : symétrie, indistinguabilité, sections efficaces, ...

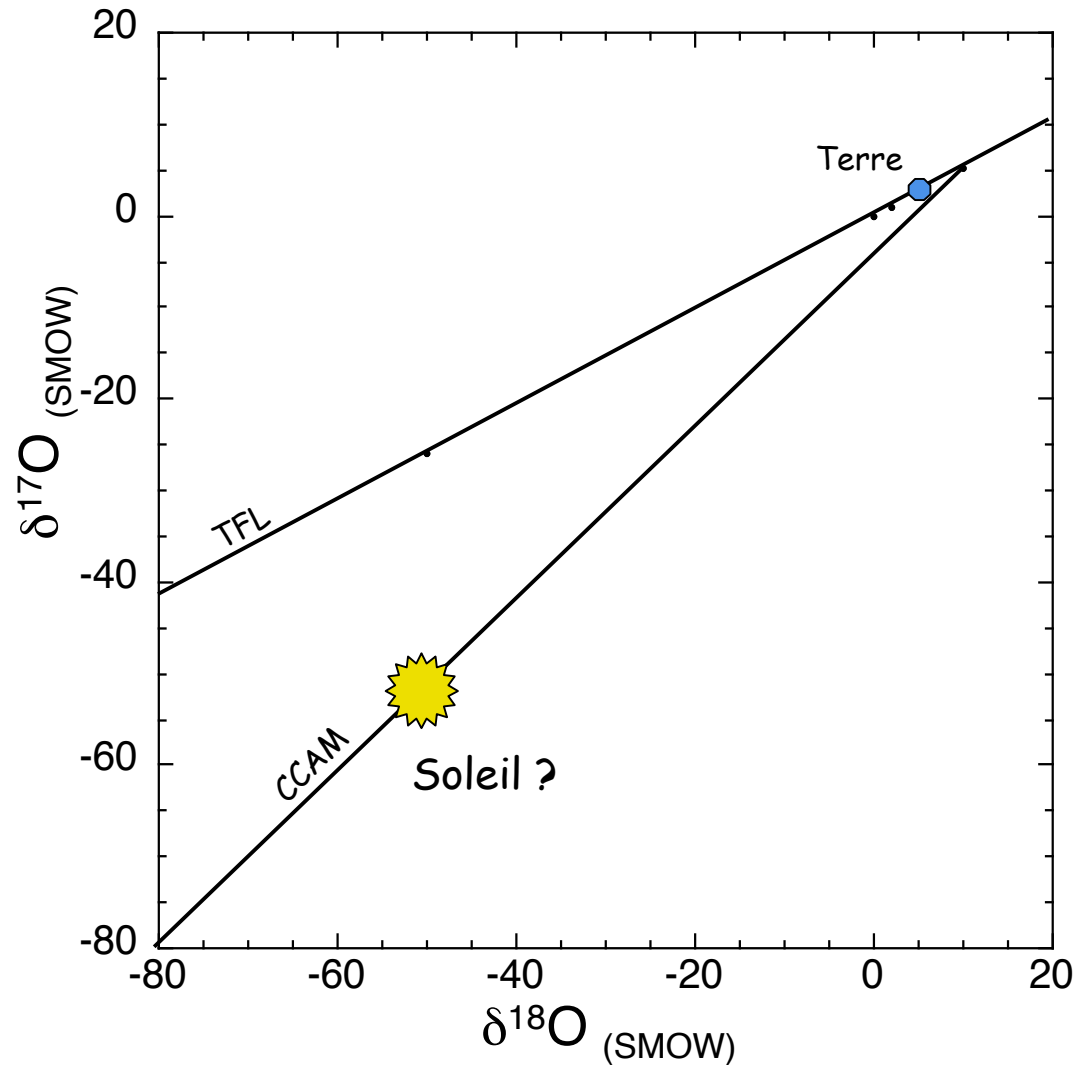
Conséquences :

- Soleil proche de la TFL ou pas ? (Heidenreich & Thiemens, 1986 ; Thiemens 1999) ou non (selon les interprétations du fractionnement isotopique)



Thiemens & Heidenreich, 1983

Quelle est l'origine des variations isotopiques de l'oxygène dans le système solaire ?

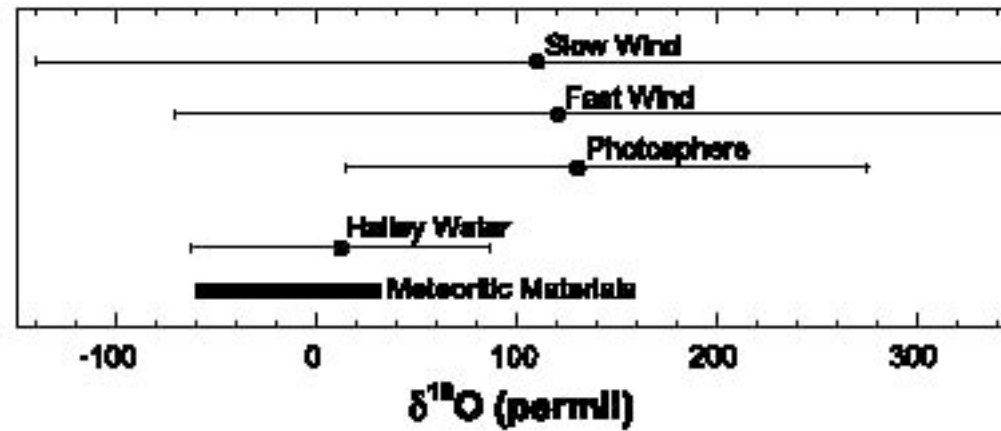


(3) Réactions photochimiques :
self-shielding de la lumière UV
par le gaz de la nébuleuse
(Thiemens & Heidenreich, 1983 ;
Clayton, 2002)

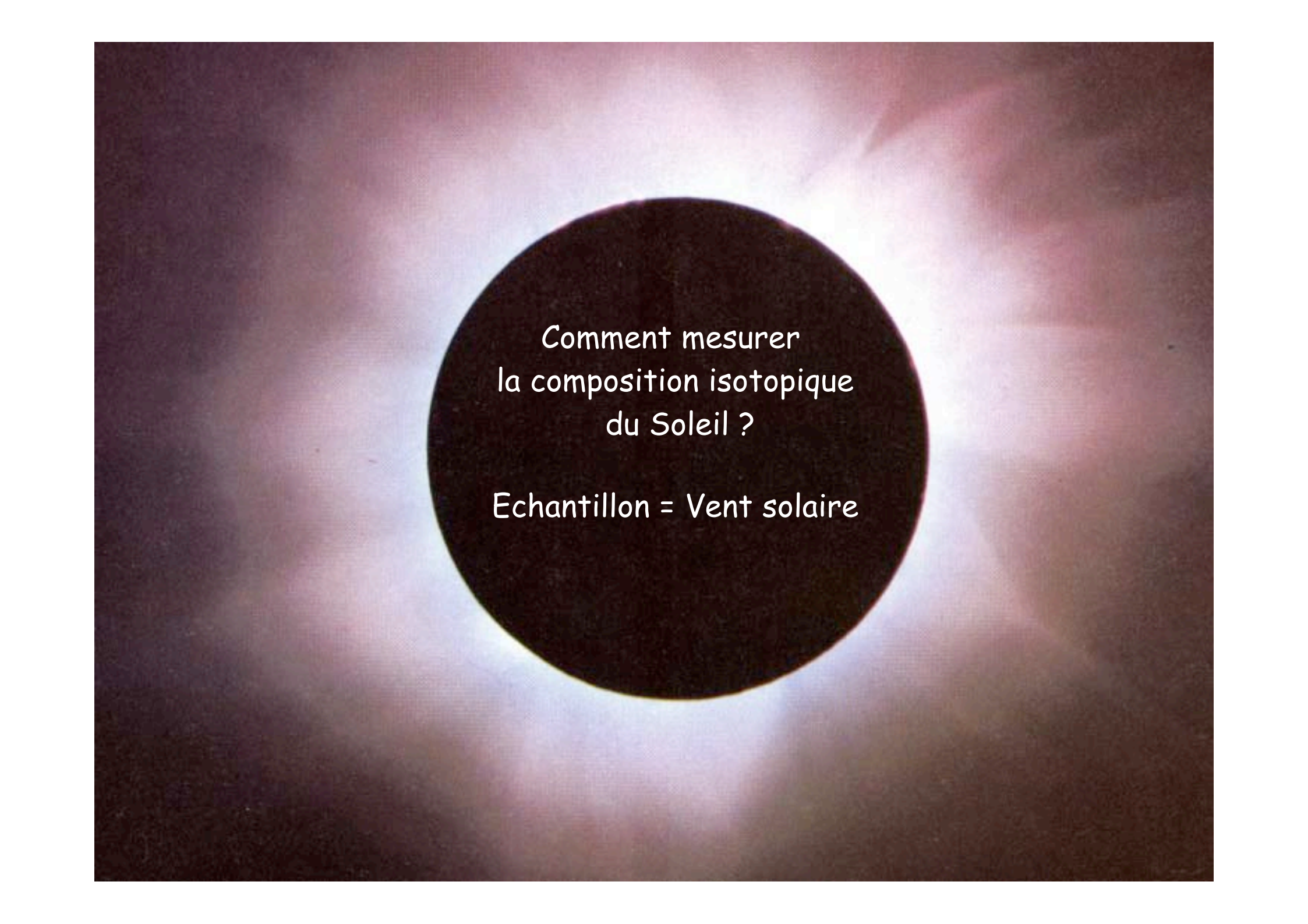
Conséquences :

- Soleil riche en ^{16}O
- effets isotopiques pour C & N ?
- tous les silicates du système solaire (sauf CAIs) ont une "anomalie" de leur composition isotopique de l'oxygène

Il faut connaître la composition isotopique de l'oxygène du Soleil.
Les mesures spectroscopiques sont trop imprécises



(synthèse de Wiens et al., 2004)

The background of the slide is a photograph of a solar eclipse, showing the sun's corona and the dark disk of the moon. In the center, there is a dark circular graphic containing white text.

Comment mesurer
la composition isotopique
du Soleil ?

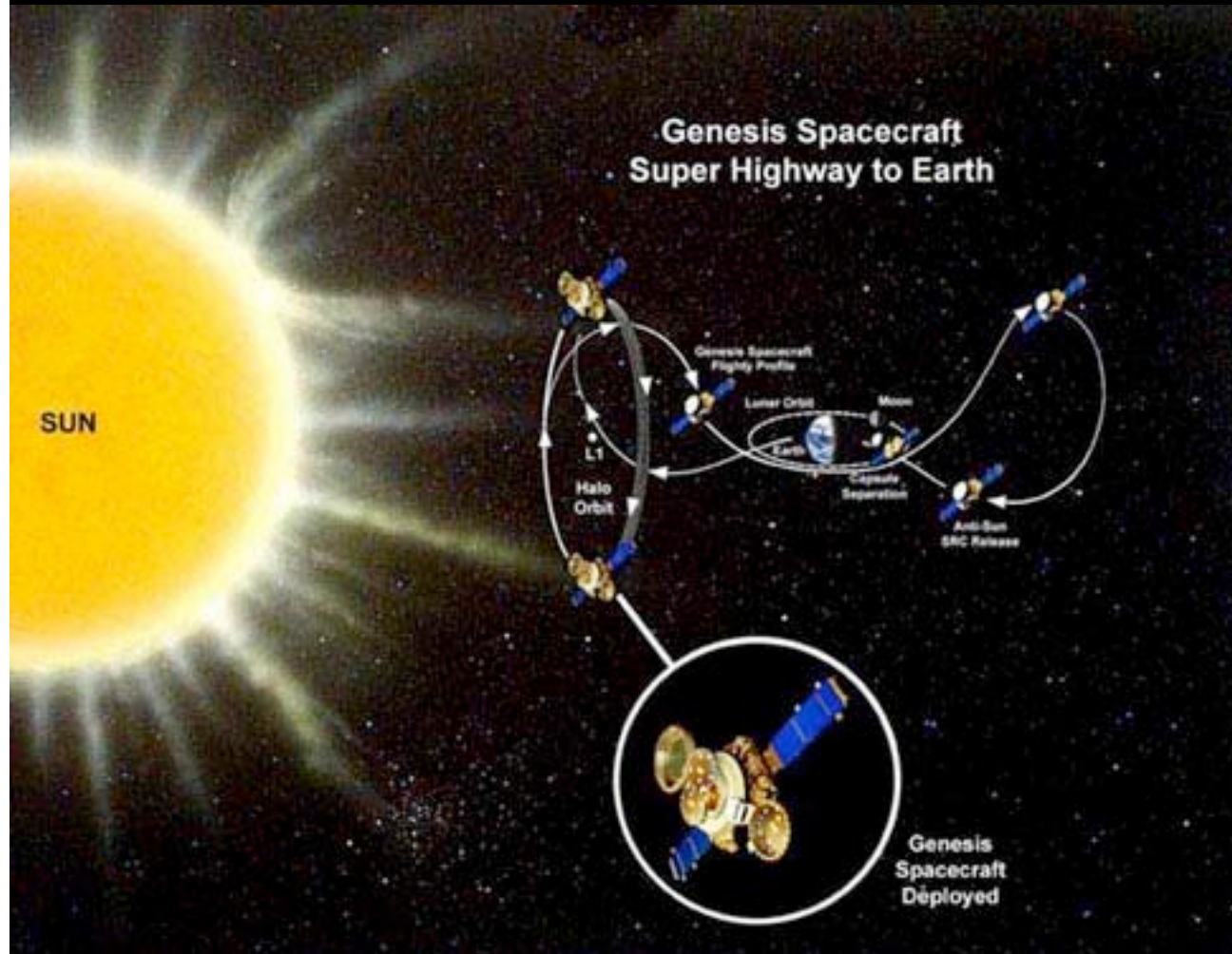
Echantillon = Vent solaire

La mission Genesis de la Nasa vient de ramener 10^{20} ions de vent solaire (=0,4 milli grammes) collectés en 884 jours à proximité du Soleil (1,5 millions de km de la Terre).

Objectifs de la mission :
compositions isotopiques

- O
- N (& C)
- gaz rares
- Li, B
- ...

compositions élémentaires





Chaussidon M. & Robert F. (1999) Lithium nucleosynthesis in the Sun inferred from the solar wind $^7\text{Li}/^6\text{Li}$ ratio. *Nature* 402, 270-274.

Hashizume K., Chaussidon M., Marty B. & Robert F. (2000) Solar wind record on the Moon : deciphering presolar from planetary nitrogen. *Science* 290, 1142-1145.

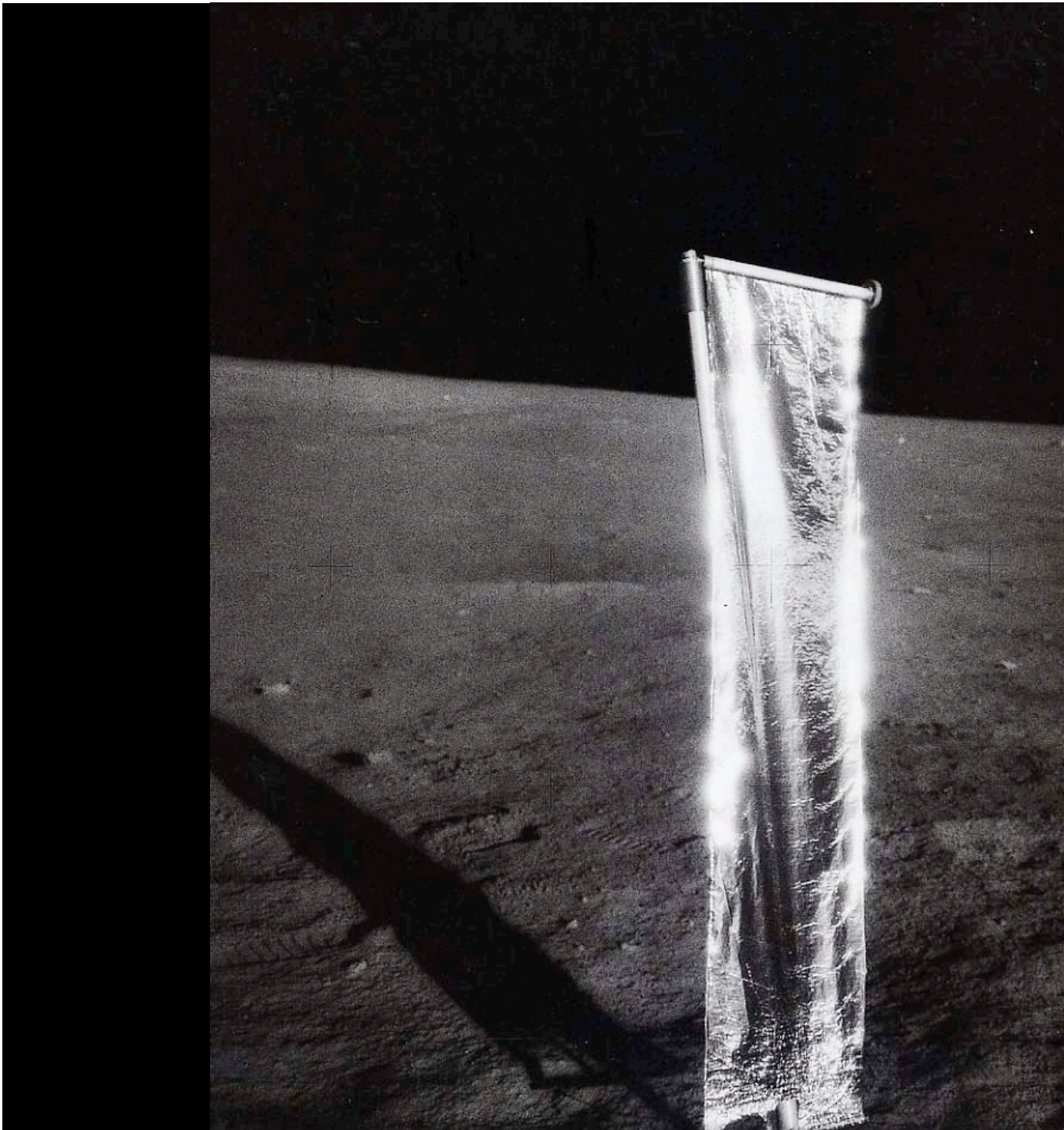
Hashizume K., Chaussidon M., Marty B. & Terada K. (2004) Protosolar carbon isotopic composition : implications on the origin of meteoritic organics. *Astrophysical Journal* 600, 480-484.

Hashizume K. & Chaussidon M. (2005) Oxygen isotopic composition of solar particles in lunar soils: a ^{16}O -rich protosolar nebula. *Nature* 434, 619-622.



Les sols lunaires

Des collecteurs naturels
de vent solaire :
+ temps d'exposition très longs
- impuretés des minéraux cibles



Bande d'aluminium
(1,40 m x 30 cm)
déployée par les
astronautes
d'Apollo 12 en
novembre 1969
pendant 18 heures
pour collecter le
vent solaire

Les sols lunaires contiennent bien un composant de surface solaire

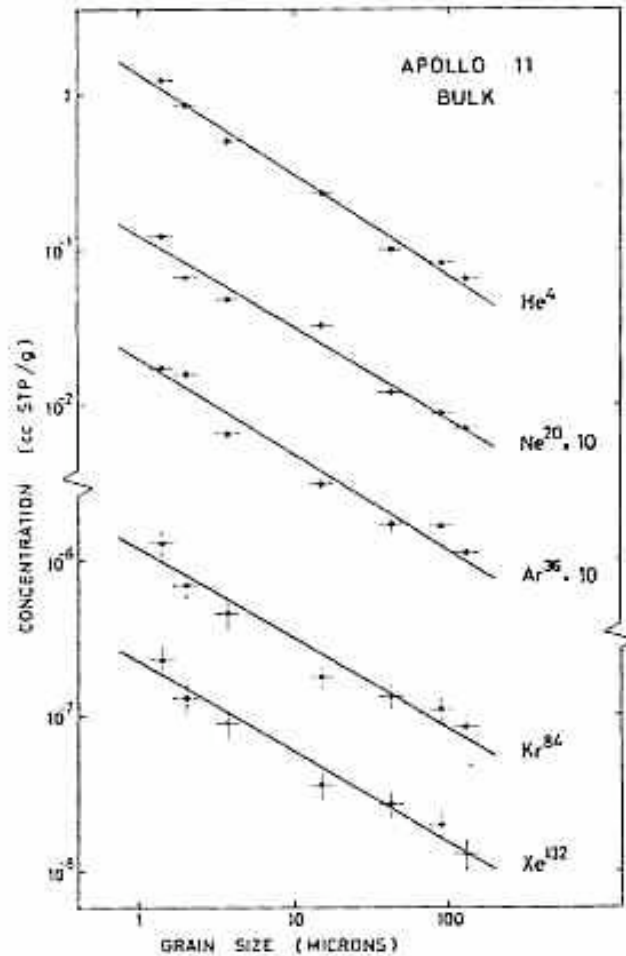


Fig. 2. Grain size dependence of measured He^4 , Ne^{20} , Ar^{36} , Kr^{84} and Xe^{132} in unseparated Apollo 11 lunar fine material (No. 10084).

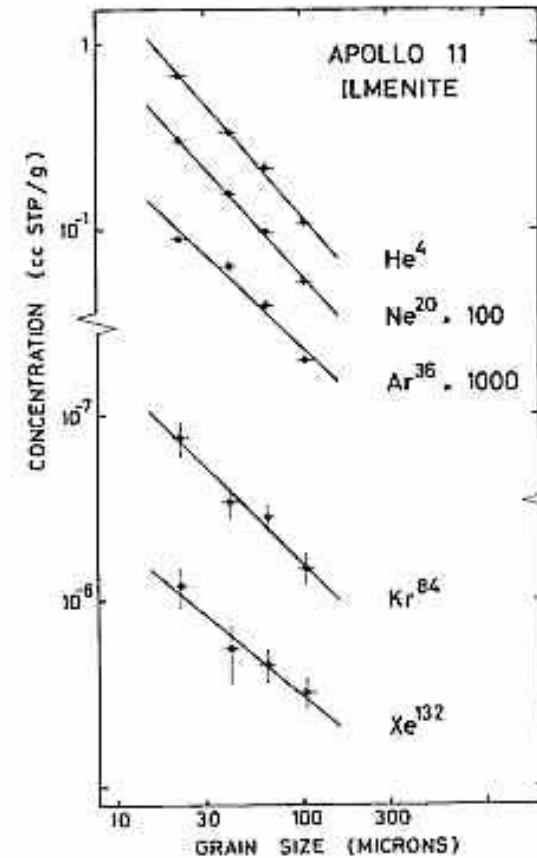
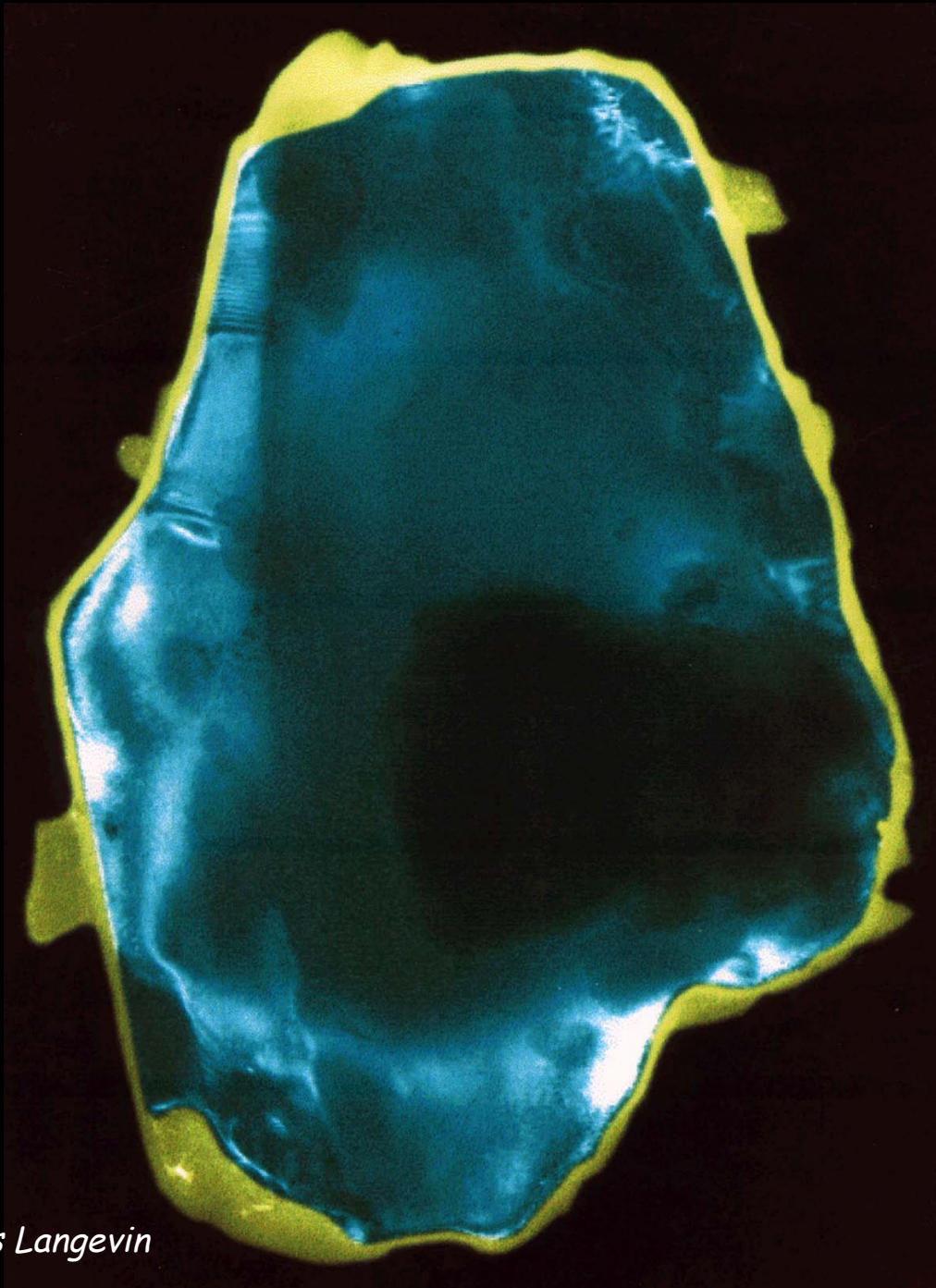


Fig. 3. Grain size dependence of measured He^4 , Ne^{20} , Ar^{36} , Kr^{84} and Xe^{132} in ilmenite ($FeTiO_3$) separated from the Apollo 11 lunar fine material (No. 10084).

(Eberhardt et al., 1970)

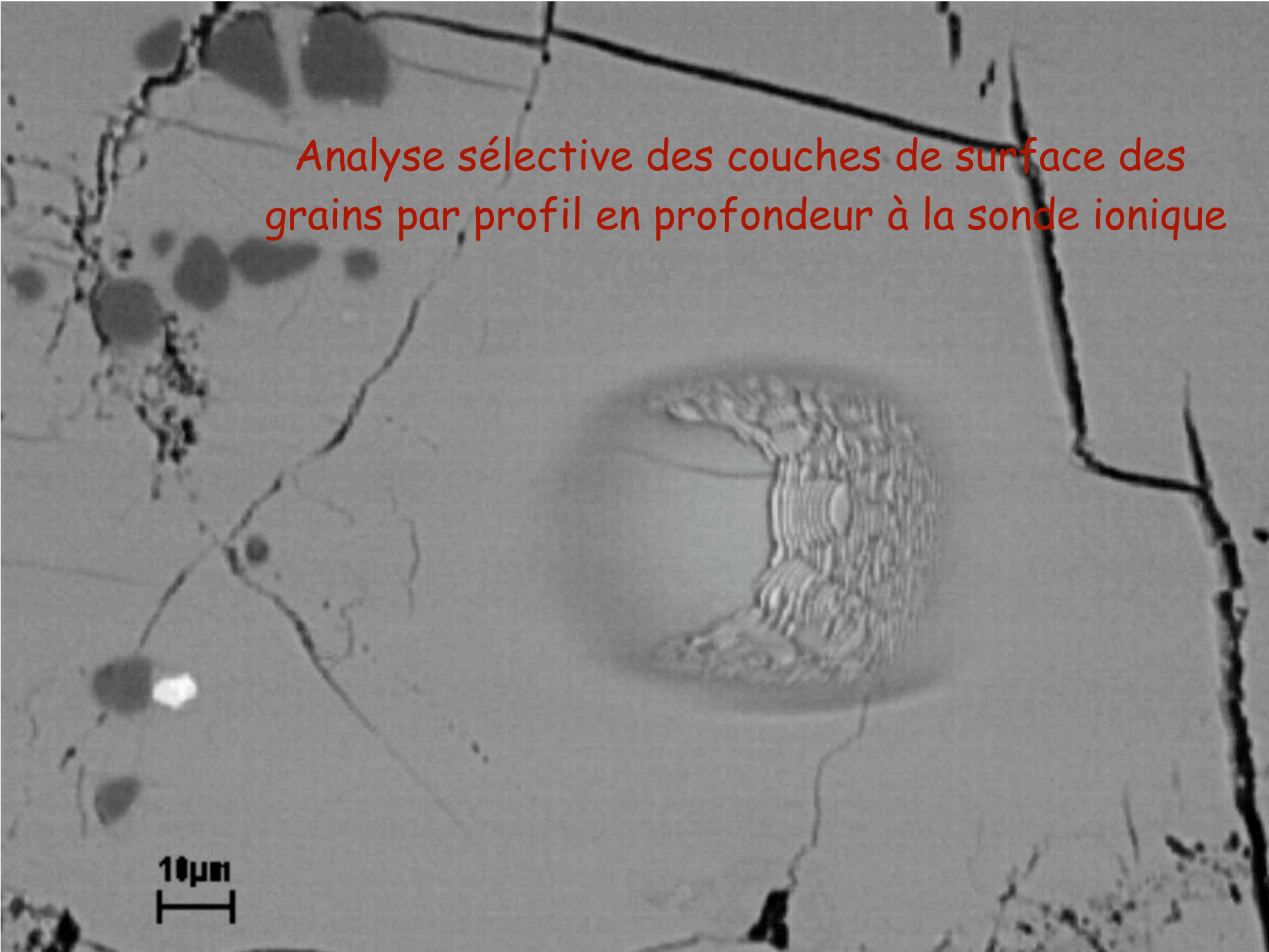


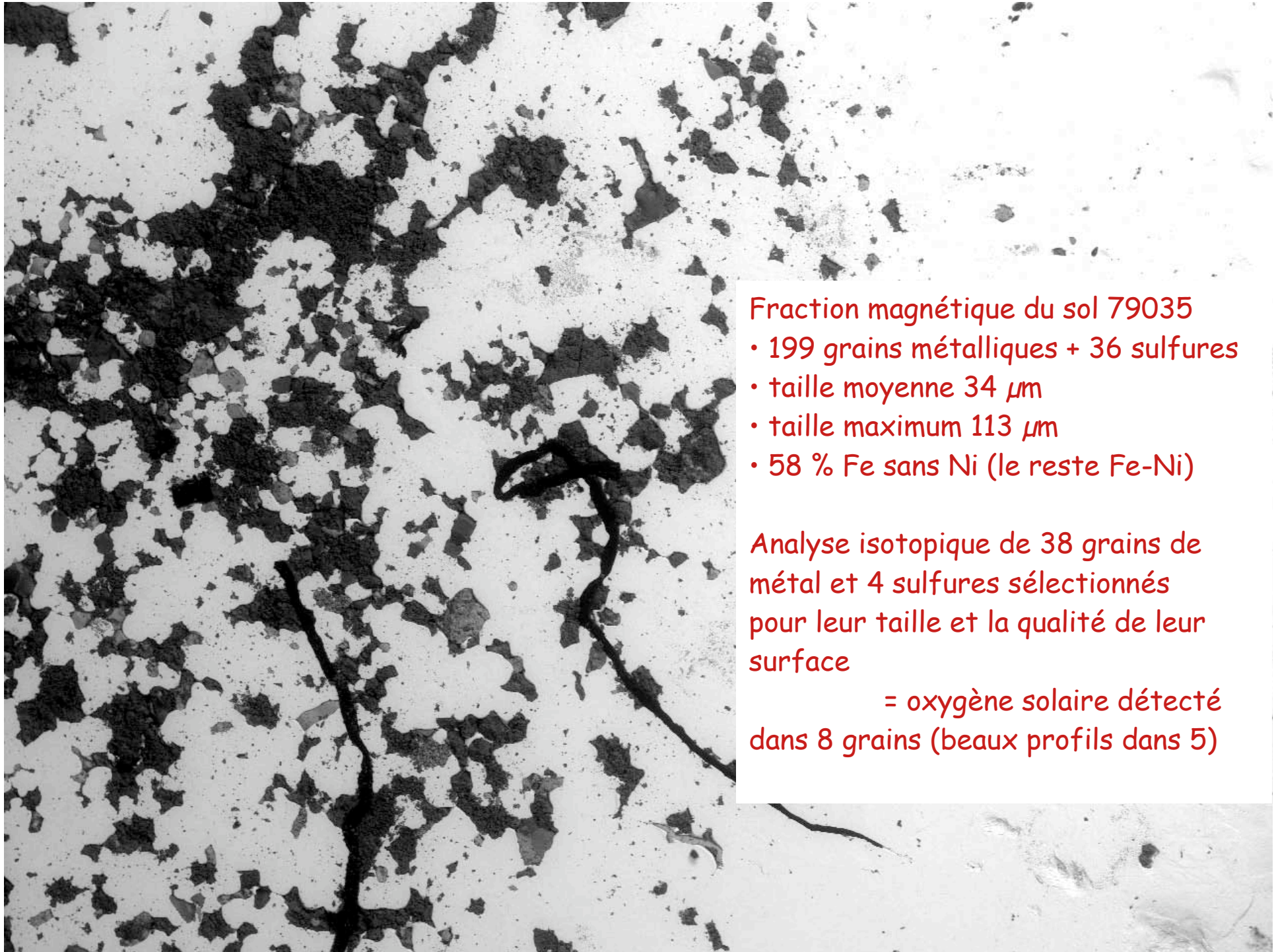
Les grains
des
sols lunaires

Photo Yves Langevin

Analyse sélective des couches de surface des grains par profil en profondeur à la sonde ionique

10 μ m

A grayscale micrograph showing a cross-section of a material. The central region features a distinct, layered or fibrous structure, possibly representing a grain boundary or a surface layer. The surrounding material has a more uniform, granular appearance. A scale bar in the bottom left corner indicates a length of 10 micrometers. The text 'Analyse sélective des couches de surface des grains par profil en profondeur à la sonde ionique' is overlaid in red at the top of the image.

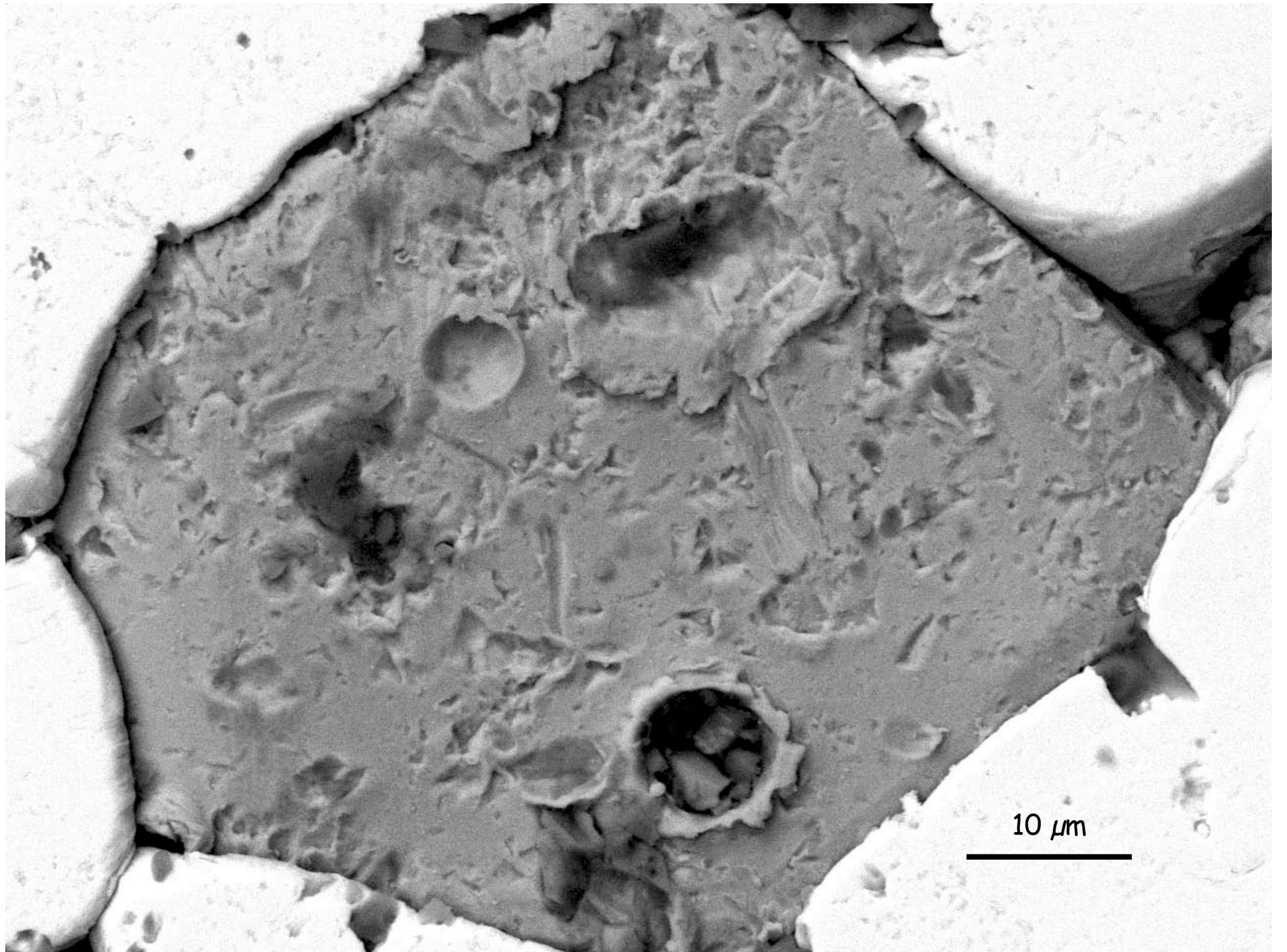


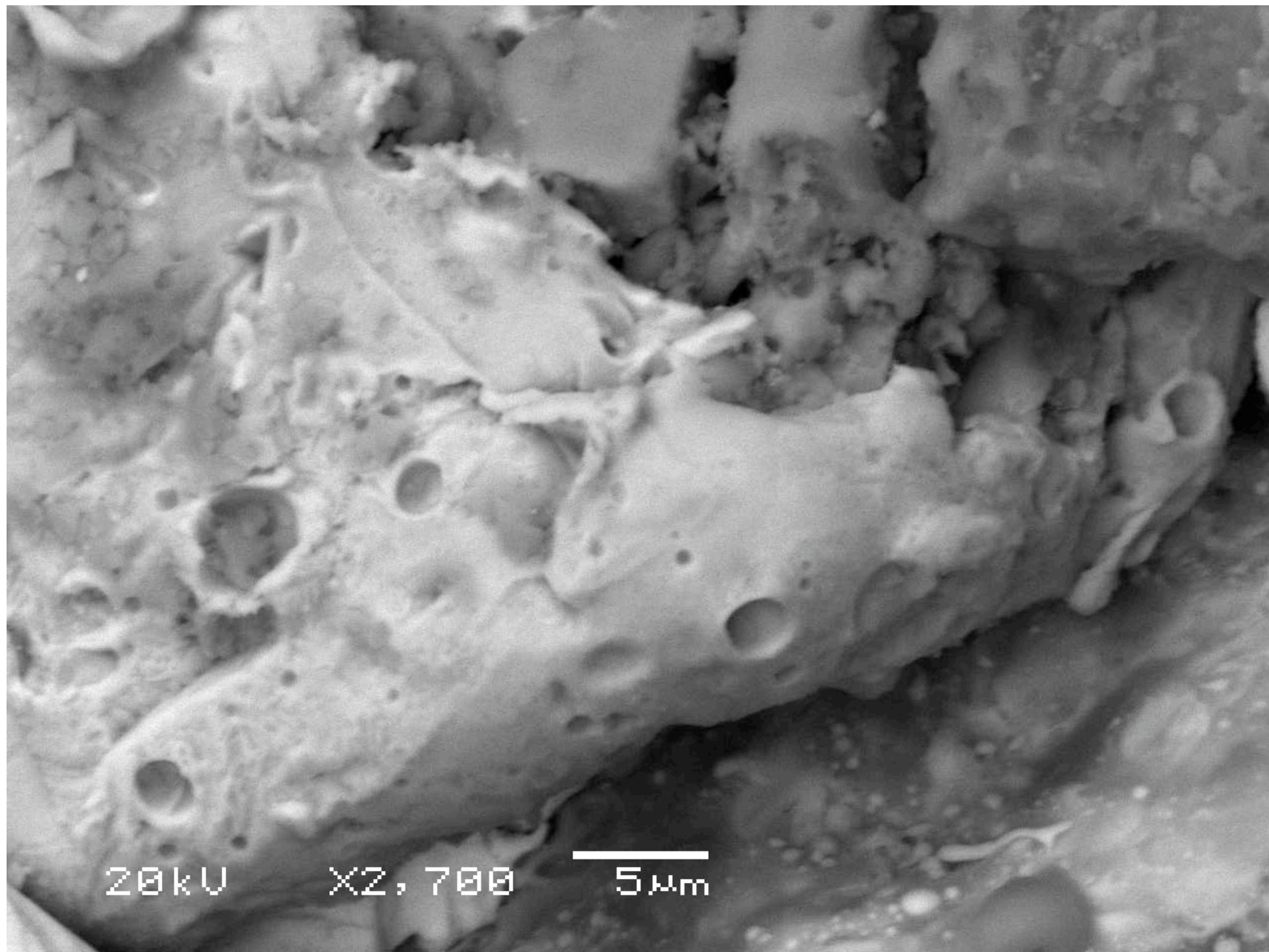
Fraction magnétique du sol 79035

- 199 grains métalliques + 36 sulfures
- taille moyenne $34 \mu\text{m}$
- taille maximum $113 \mu\text{m}$
- 58 % Fe sans Ni (le reste Fe-Ni)

Analyse isotopique de 38 grains de métal et 4 sulfures sélectionnés pour leur taille et la qualité de leur surface

= oxygène solaire détecté dans 8 grains (beaux profils dans 5)





20kV

X2,700

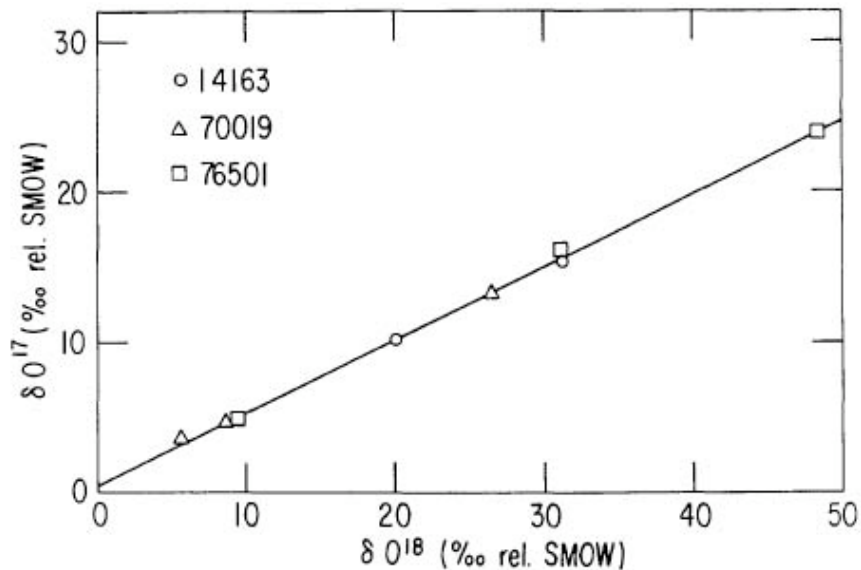
5µm

Les trois composants contenant de l'oxygène déjà identifiés dans les sols lunaires

(1) les silicates lunaires

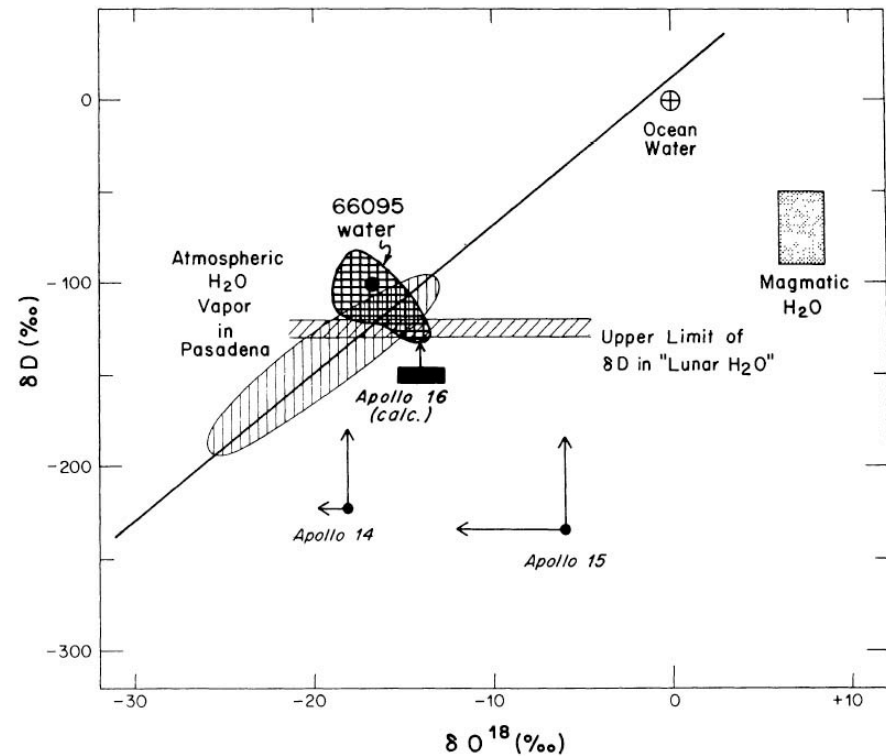
manteau lunaire, $\delta^{18}\text{O} = +5$ à $+7\text{‰}$,
 $\Delta^{17}\text{O} = 0.001 \pm 0.016\text{‰}$

(2) Le composant fractionné par évaporation/condensation



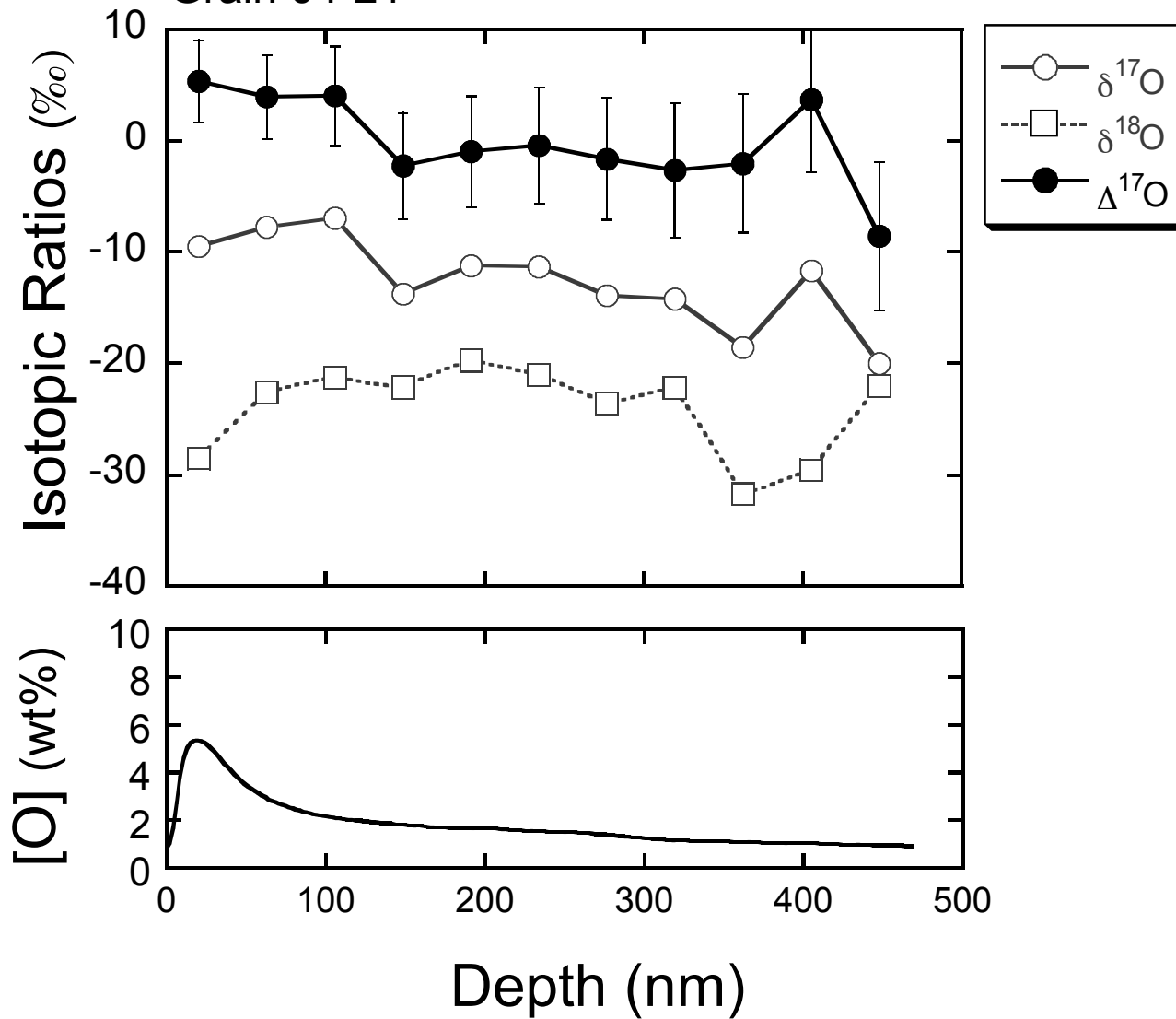
$\delta^{18}\text{O} = +40$ ou $+50\text{‰}$ et $\Delta^{17}\text{O} = 0 \text{‰}$
 (Clayton, et al., 1974)

(3) La couche d'oxyde faite sur Terre

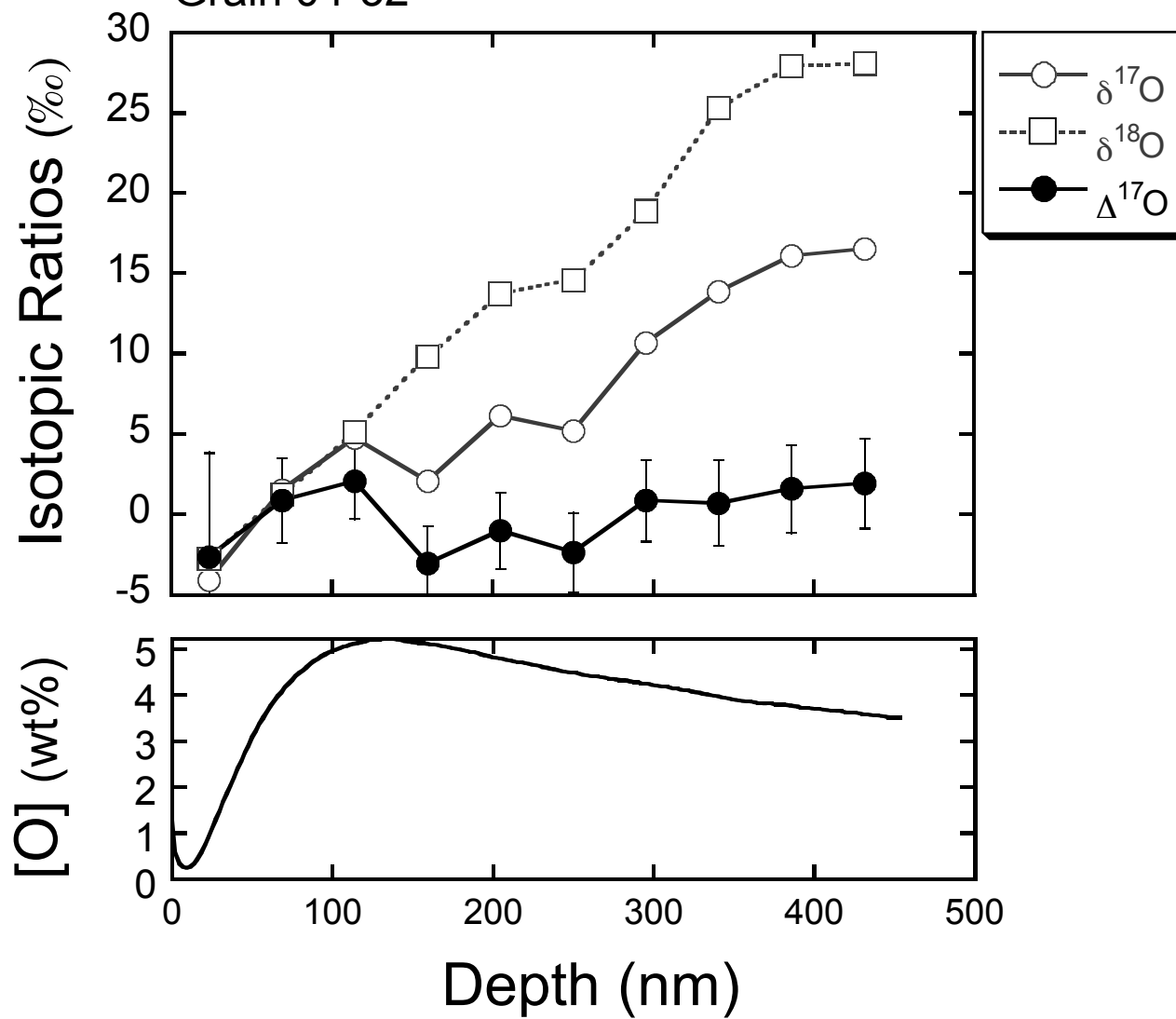


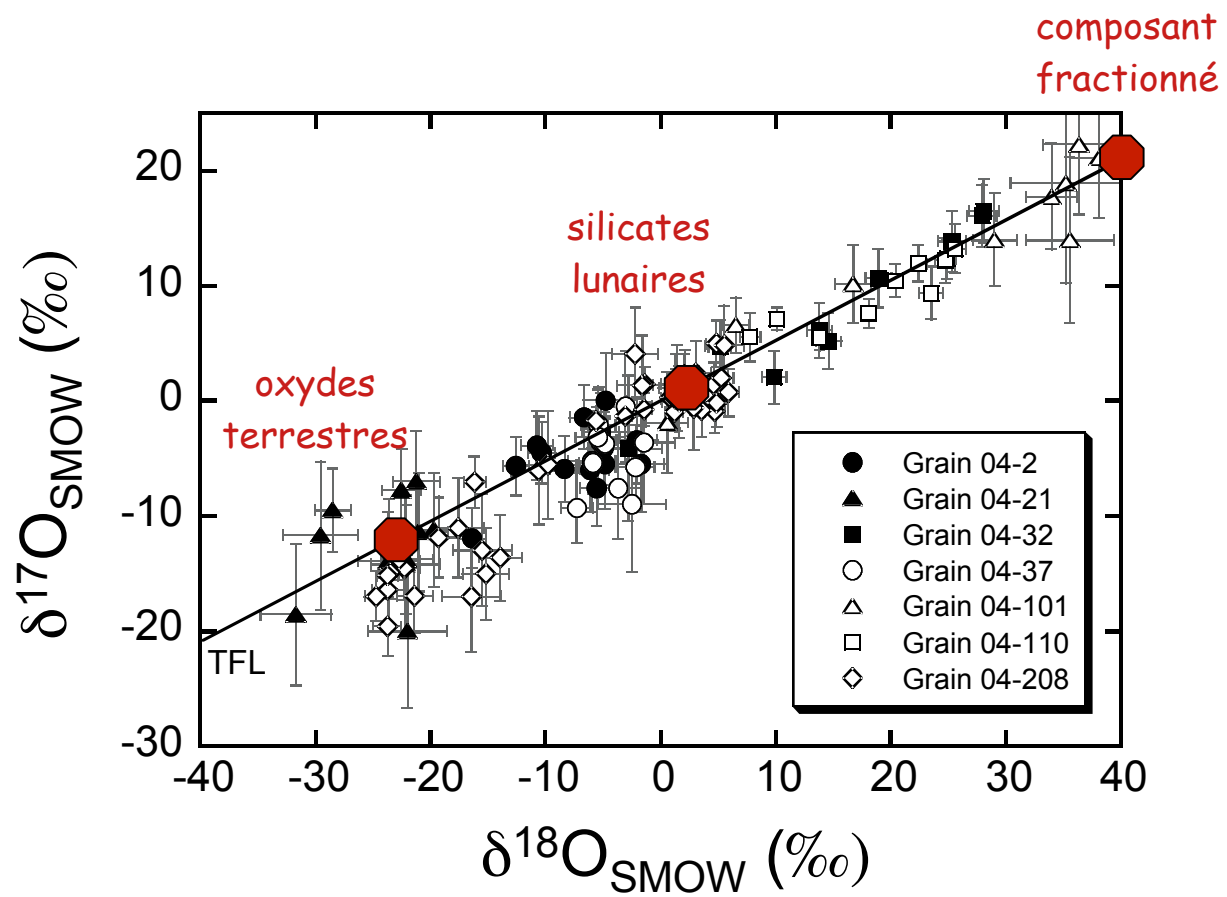
$\delta^{18}\text{O} \approx -20\text{‰}$ et $\Delta^{17}\text{O} = 0 \text{‰}$
 (Epstein & Taylor, 1974)

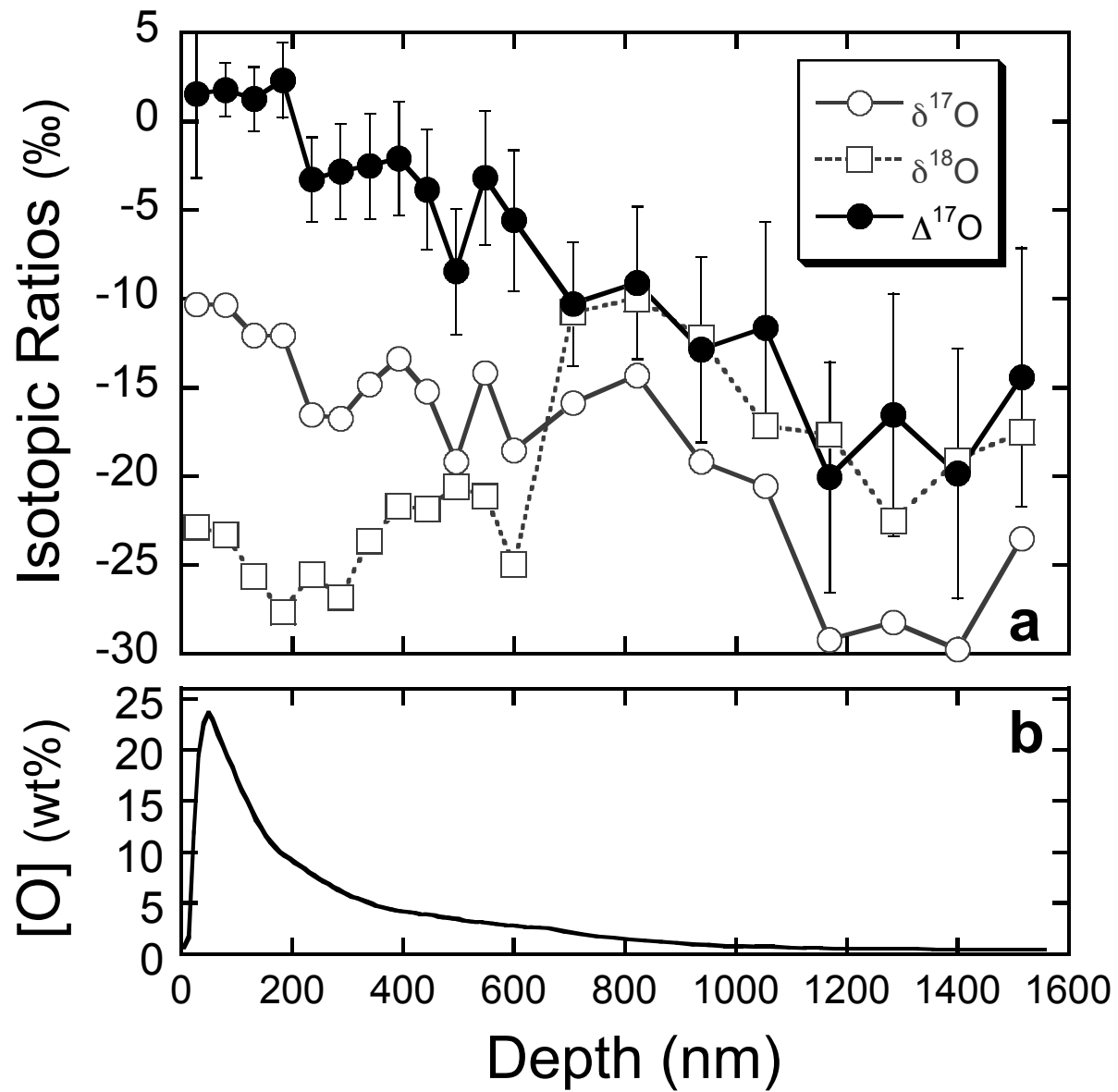
Grain 04-21

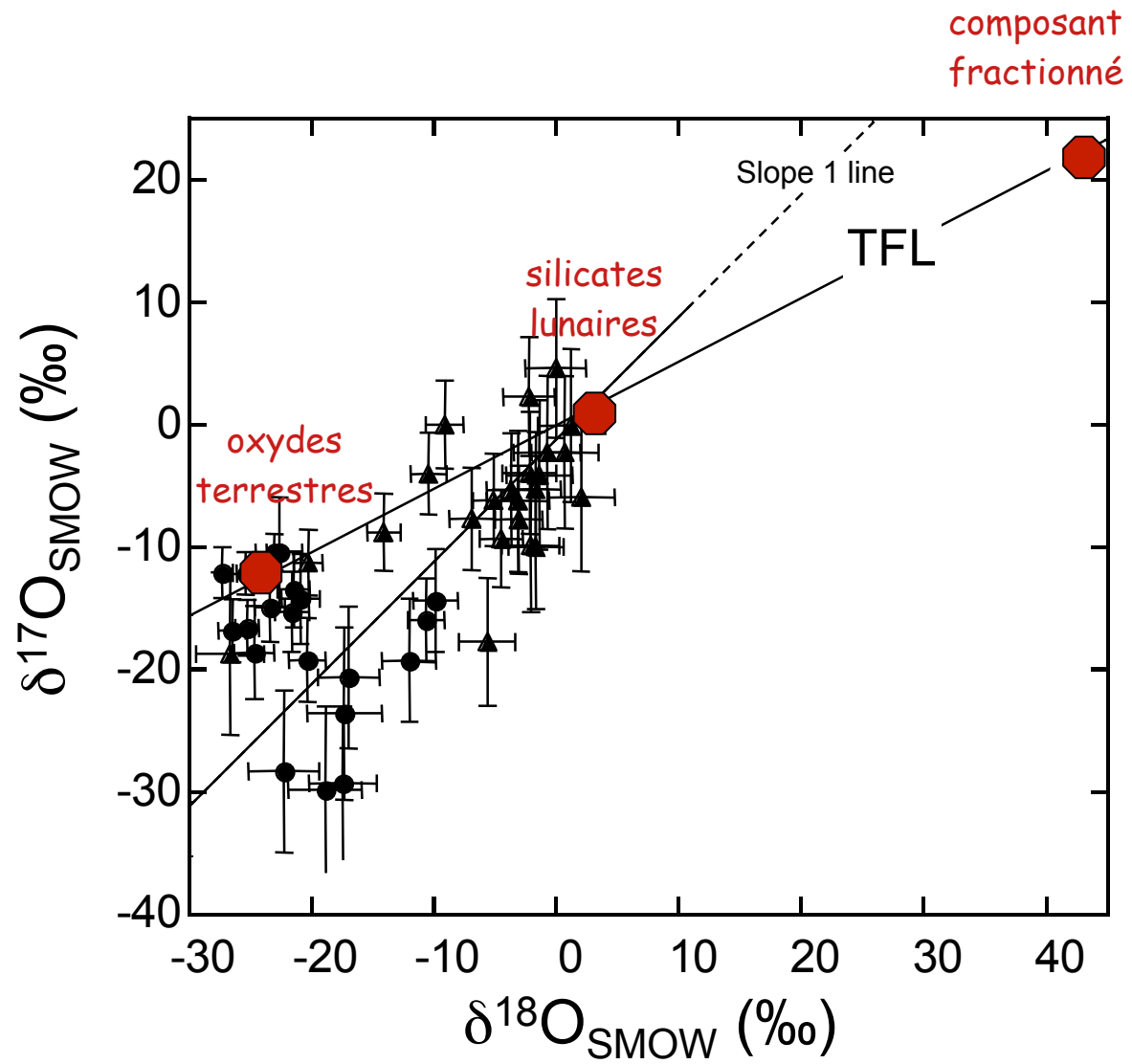


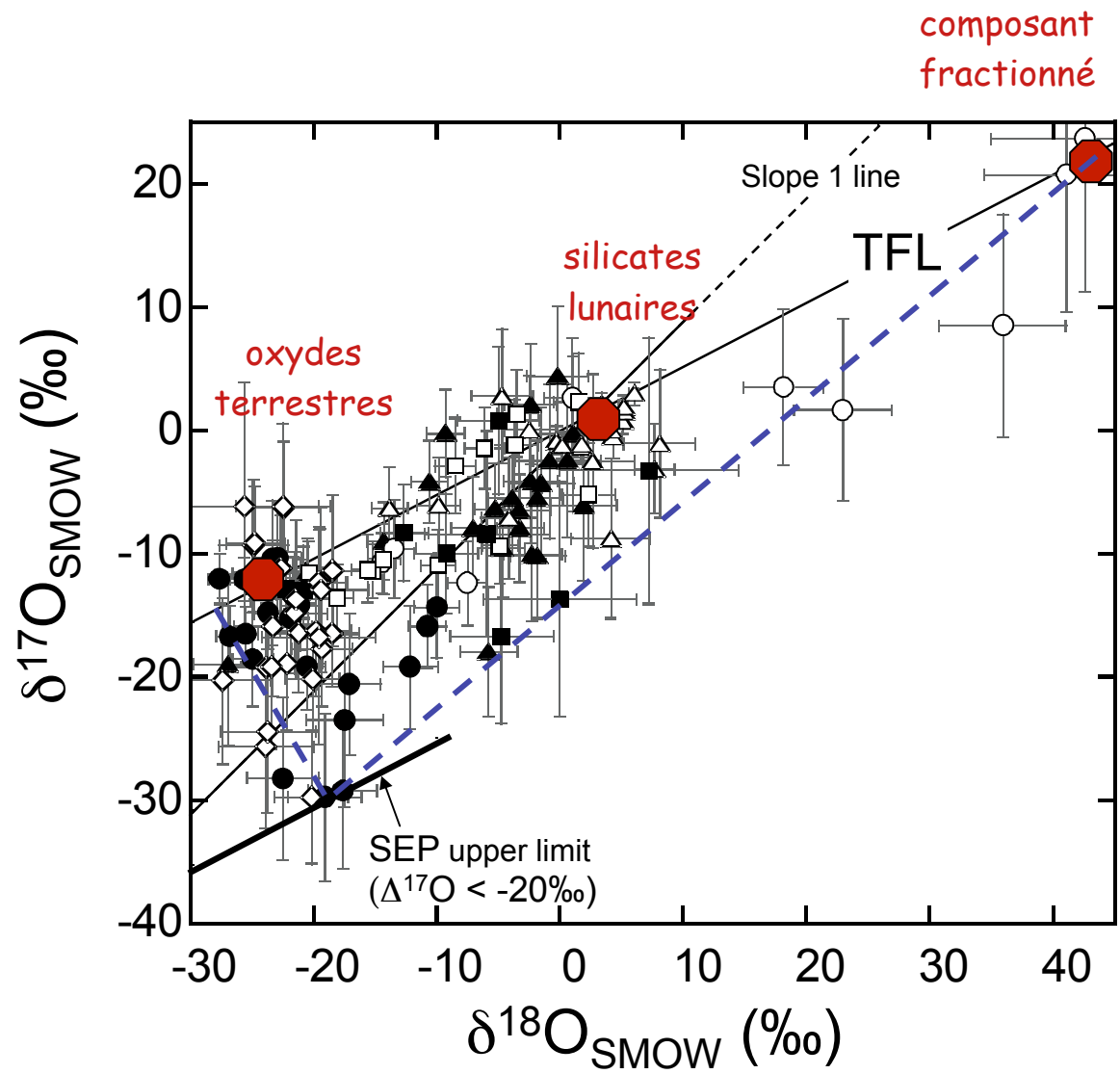
Grain 04-32

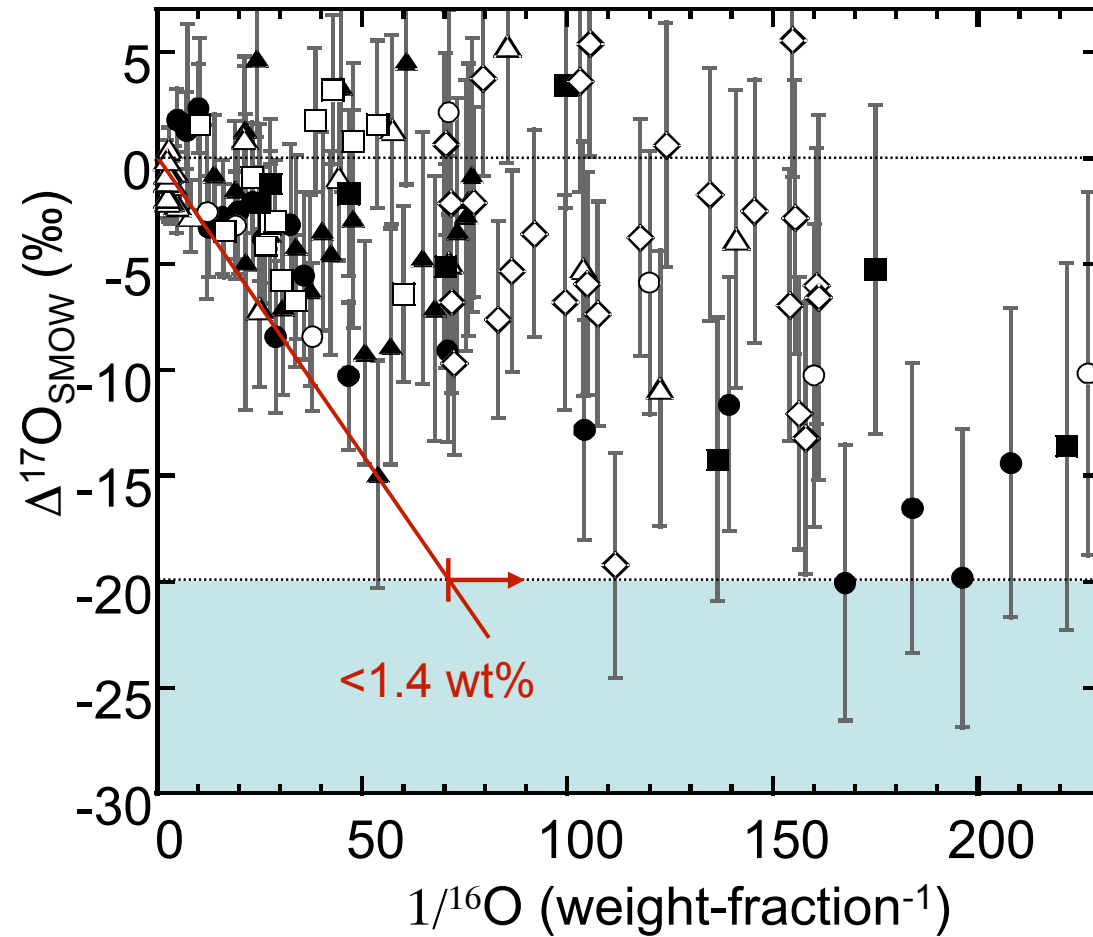




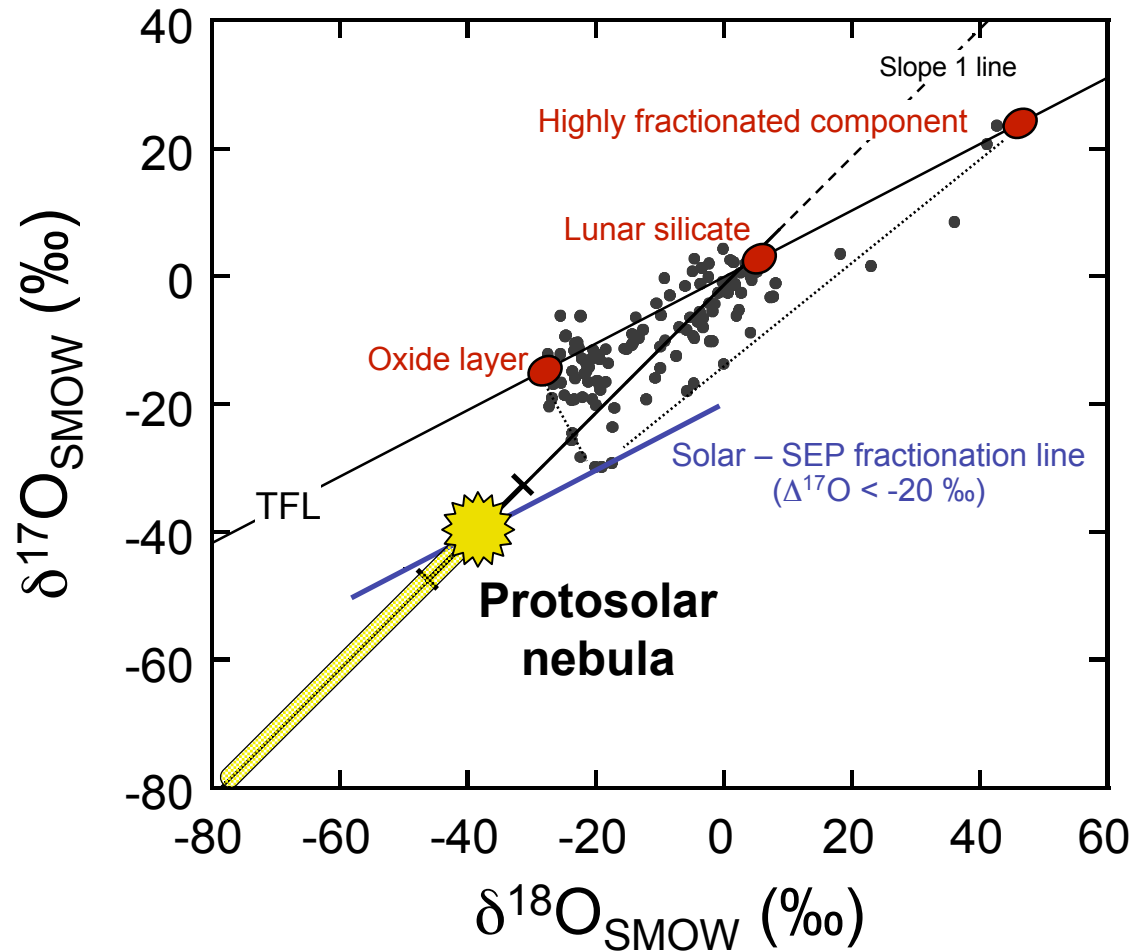








< 1,4 wt % O : en accord avec 5000 ppm C du SEP mesurés dans les silicates du même sol (79035) et un rapport O/C de 2 g/g dans le SEP

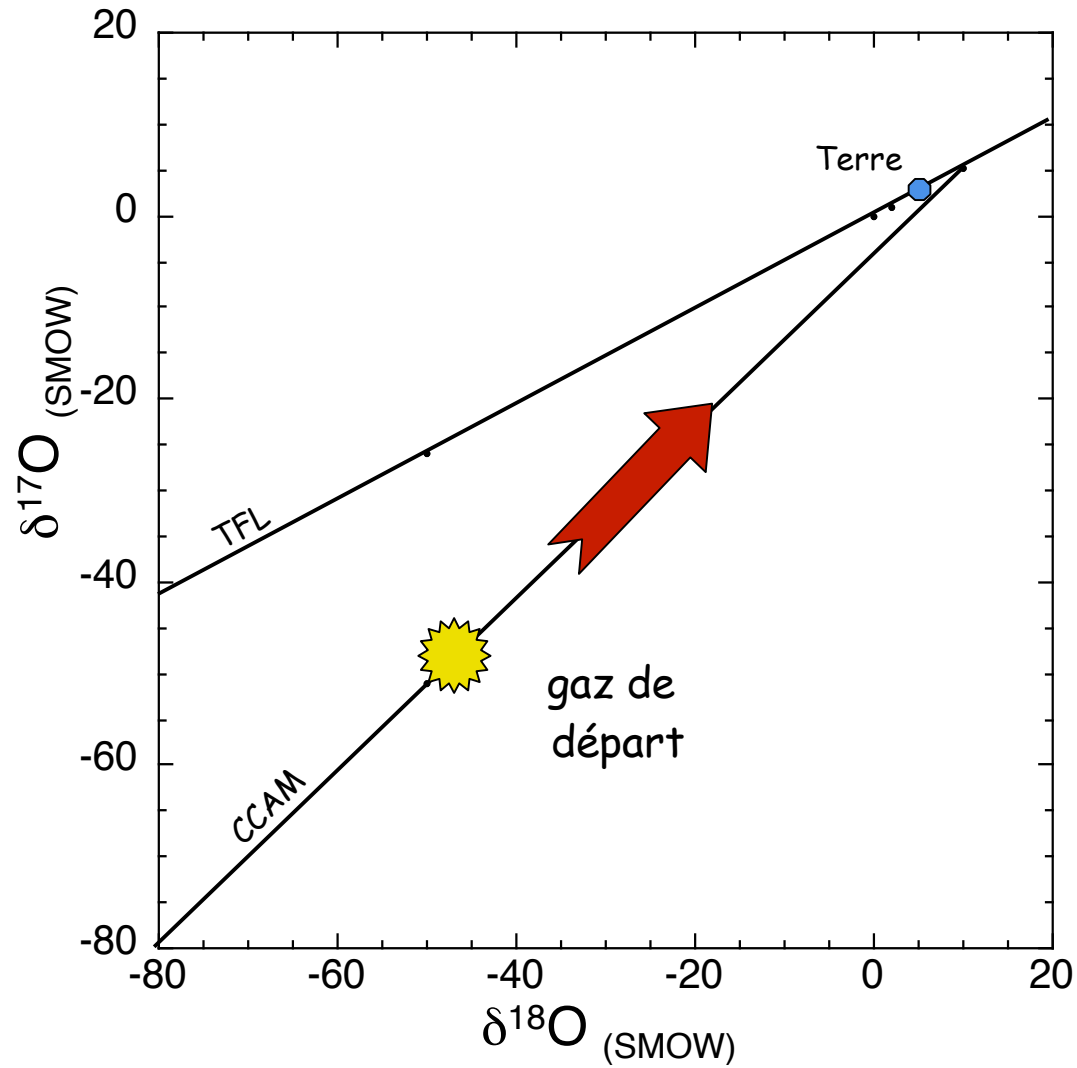


Le SEP est isotopiquement fractionné (de masse) par rapport au vent solaire (SW) et au Soleil (Wiens et al., 2004) avec pour les $\delta^{18}\text{O}$:

$$-50\text{‰} < \Delta_{\text{Soleil-SW}} < 0\text{‰}$$

$$0\text{‰} < \Delta_{\text{SEP-SW}} < +260\text{‰}$$

Seules les CAIs n'ont pas d'anomalie isotopique de l'oxygène !

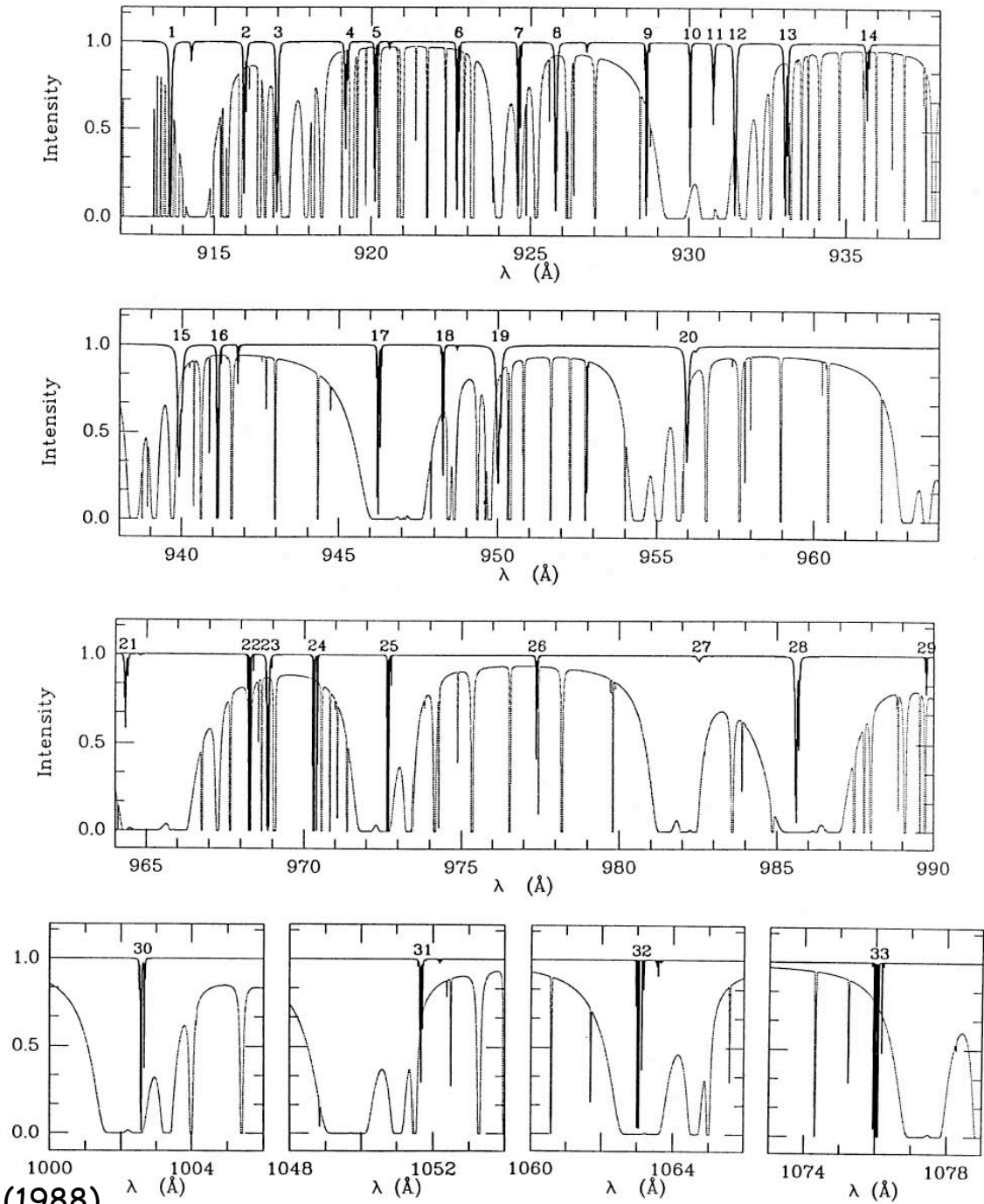


Les silicates se sont formés à partir d'oxygène enrichi en ^{17}O et ^{18}O par :

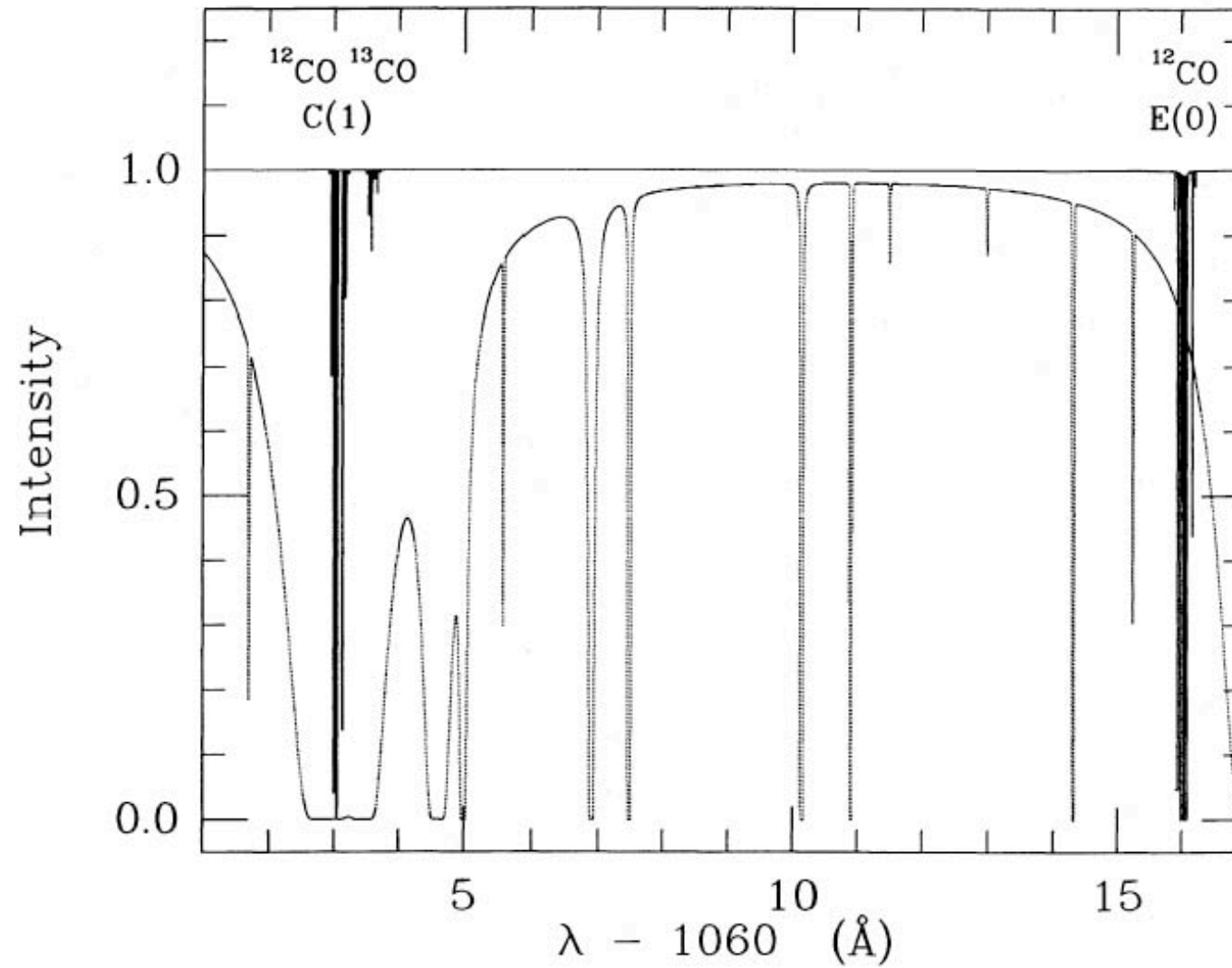
- réactions non dépendantes de la masse ?
- self shielding ?

le self shielding de la lumière UV par le gaz de la nébuleuse

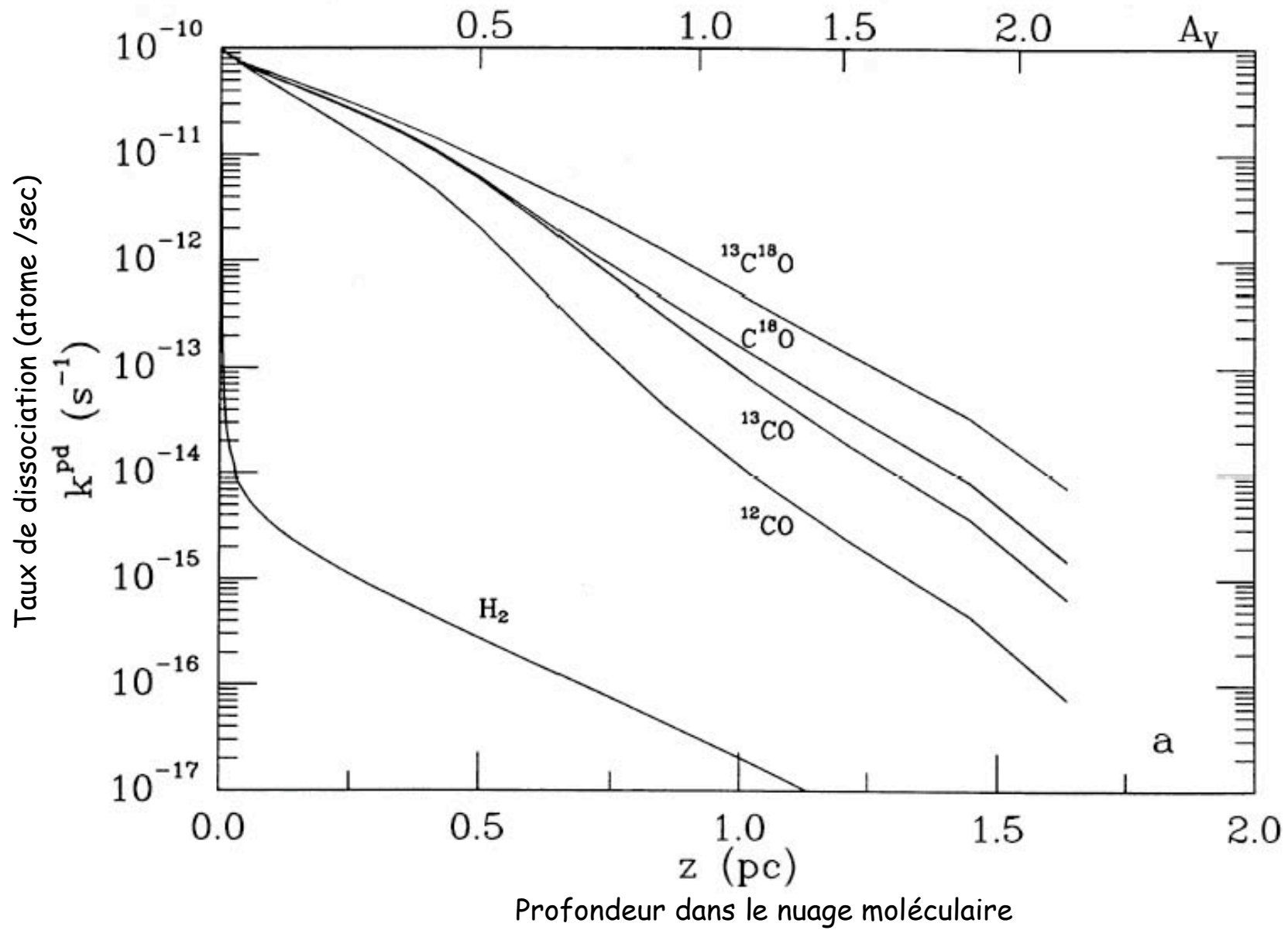
- comment ?
 - C, N & O sous forme gazeuse, CO et N₂ qui ont une photochimie proche
 - CO et N₂ sont photolysés par la lumière UV entre ≈ 90 et ≈ 110 nm
 - ¹²C¹⁶O et ¹⁴N¹⁴N deviennent optiquement épais
 - en profondeur dans le nuage dissociation des espèces rares ¹²C¹⁷O ou ¹²C¹⁸O
 - les ¹⁷O* et ¹⁸O* réagissent :
$$\begin{aligned} \text{CO} &\longrightarrow \text{C} + \text{O} \\ \text{O} + \text{H}_2 &\longrightarrow \text{OH} + \text{H} \\ \text{OH} + \text{H}_2 &\longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H} \\ \text{OH} + \text{SiO} &\longrightarrow \text{SiO}_2 + \text{H} \end{aligned}$$
 - le taux de dissociation dépend bien de la concentration (donc pente 1)
 - effets (pente 1) mesurés dans nuages moléculaires (Sheffer et al., 2002)
 - mais problèmes dans le détail : ex ¹⁸O est écranté par ¹³C, ...
 - ≈ 10 à 20% des λ ne sont pas écrantées par H (Van Dishoek & Black, 1988)
 - seulement 4 λ sont libres (Lyons & Young, 2004)
 - absorption à plus haut λ 150 nm (Chakraborty & Thiemens, 2005) ?
 - temps de vie de l'anomalie dans le gaz ?
- où ?
 - autour du Soleil jeune (Clayton, 2002)
 - à la surface du disque (Lyons & Young, 2004)
 - dans la nébuleuse présolaire (Yurimoto & Kuramoto, 2004)



Van Dishoeck & Black (1988)



Van Dishoeck & Black (1988)



Van Dishoeck & Black (1988)

Conclusion

- La nébuleuse protosolaire était riche en ^{16}O ($\Delta^{17}\text{O} < -20\text{‰}$). Tous les silicates de la Terre, Mars et des corps parents des météorites sont appauvris en ^{16}O par rapport à la nébuleuse départ.
- Les variations isotopiques de l'oxygène dans le système solaire ont une origine "chimique" réactions indépendantes de la masse ou auto-écranage de la lumière UV ?
- D'une manière qualitative les compositions isotopiques (C, N & O) du vent solaire sont compatibles avec un effet de self-shielding
 - $\delta^{15}\text{N}$ vent solaire $< -280\text{‰}$ (Hashizume et al., 2000)
 - $\delta^{13}\text{C}$ vent solaire $< -120\text{‰}$ (Hashizume et al., 2004)
 - $\delta^{18}\text{O}$ vent solaire $< -40\text{‰}$
 - c'est dans le bon sens mais il faudrait le modéliser vraiment
 - et pourquoi pas un effet pour le rapport D/H ?
- Quelle que soit l'origine des variations isotopiques: il doit y avoir un lien au niveau des processus entre la fabrication des premiers minéraux et la fabrication de l'anomalie par exemple : si auto-écranage près du Soleil jeune : y a t'il une zone où P et T permettent la condensation et l'effet isotopique ?

