

La différenciation chimique des planètes: une question centrale

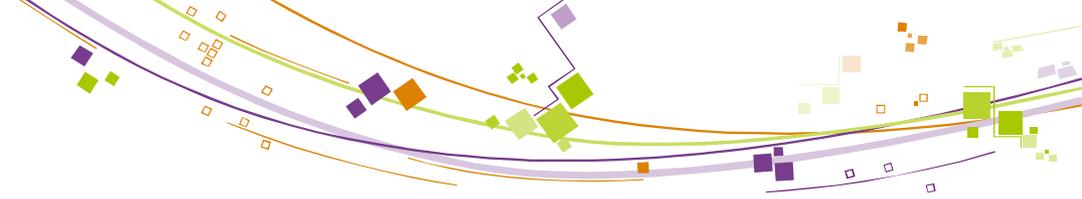
Hervé TOULHOAT
Directeur-Adjoint
Direction scientifique IFPEN





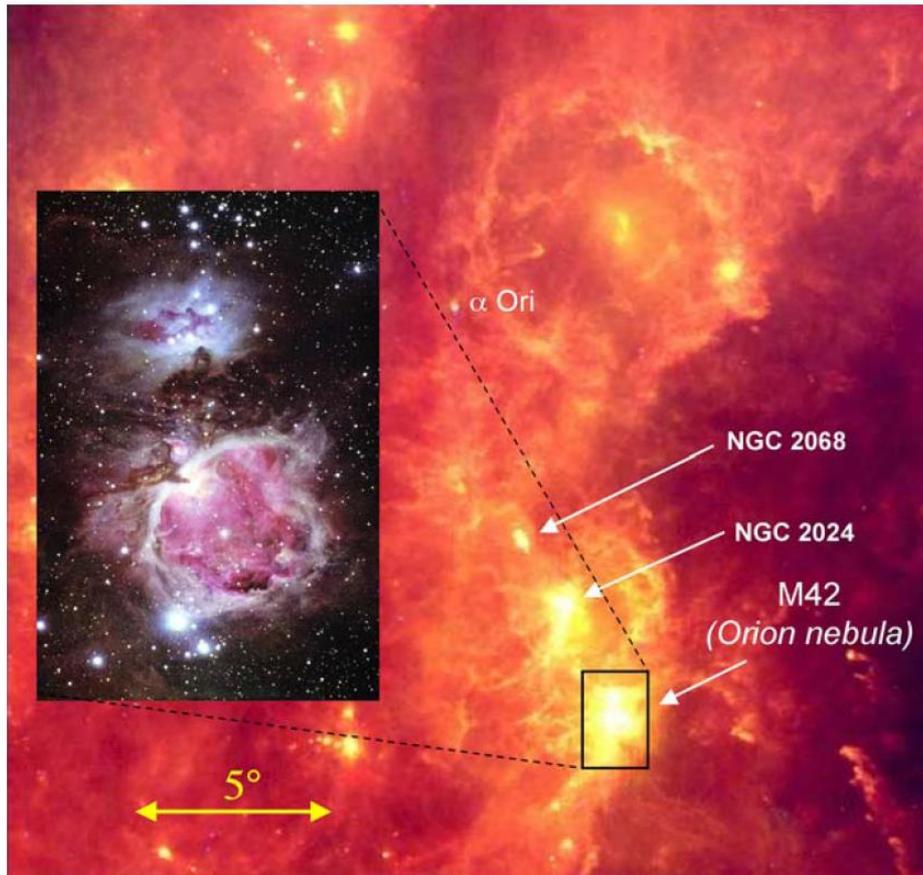
Plan de l'exposé

- **Que savons nous de la formation des planètes?**
- **Que savons nous de la composition de la Terre ?**
- **Quel phénomène gère l'abondance relative des éléments sur Terre ?**
- **Une théorie nouvelle...**
- **Testée vis à vis des données des sondes spatiales!**
- **Différenciation radiale des planètes: gravité et chimie**
- **Et l'hydrogène naturel ?**



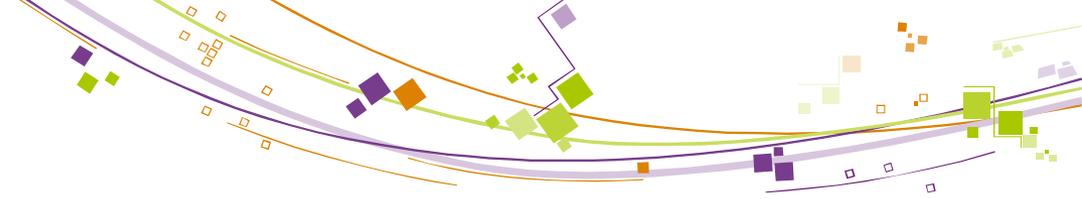
■ Que savons nous de la formation des planètes?

(Montmarle, Th. et al., *Earth, Moon and Planets*, 2006)



Un nuage interstellaire géant: le complexe d'Orion

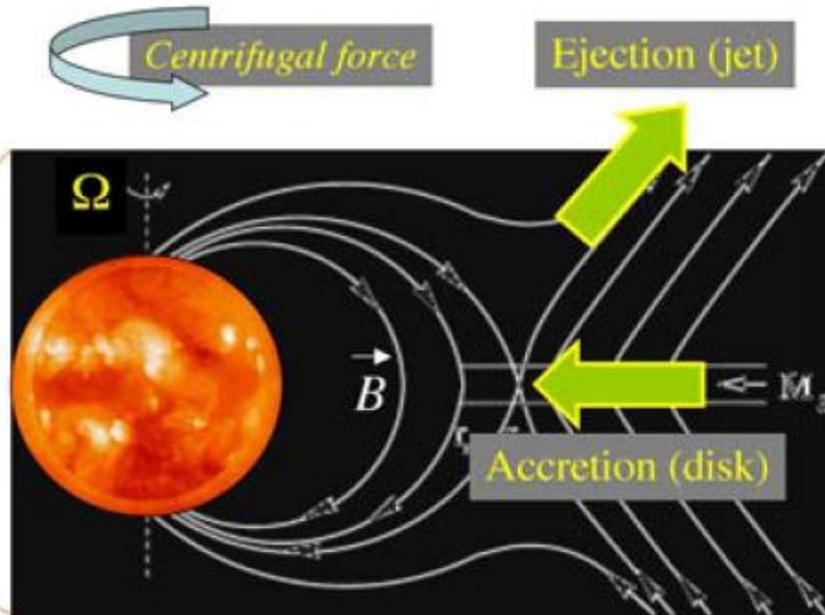
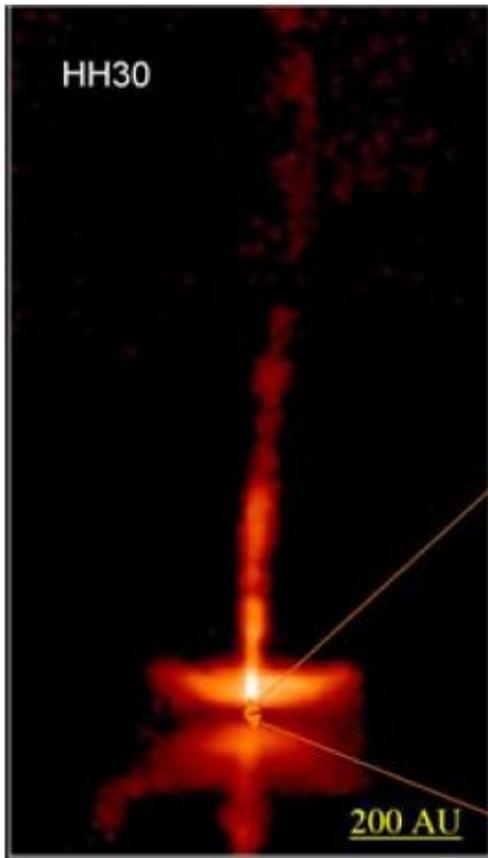
- Inséré: la nébuleuse d'Orion dans le domaine visible
- Fond d'image: image IRAS dans l'IR lointain (100μ). Les tâches brillantes sont des régions de formation d'étoiles, dont la plus active est M42

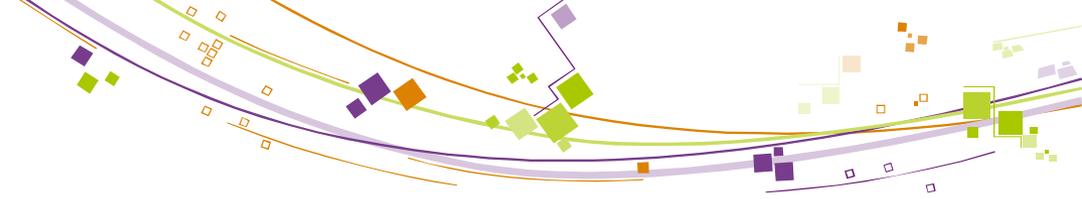


■ Que savons nous de la formation des planètes?

(Montmarle, Th. et al., *Earth, Moon and Planets*, 2006)

- Temps de formation des planètes géantes à partir des disques d'accrétion < 10 Ma
- Age du Système solaire ~ 4.5 Ga
- Les proto-étoiles de type T-Tauri émettent d'intenses flashes de rayons X ionisants





■ Que savons nous de la formation des planètes?

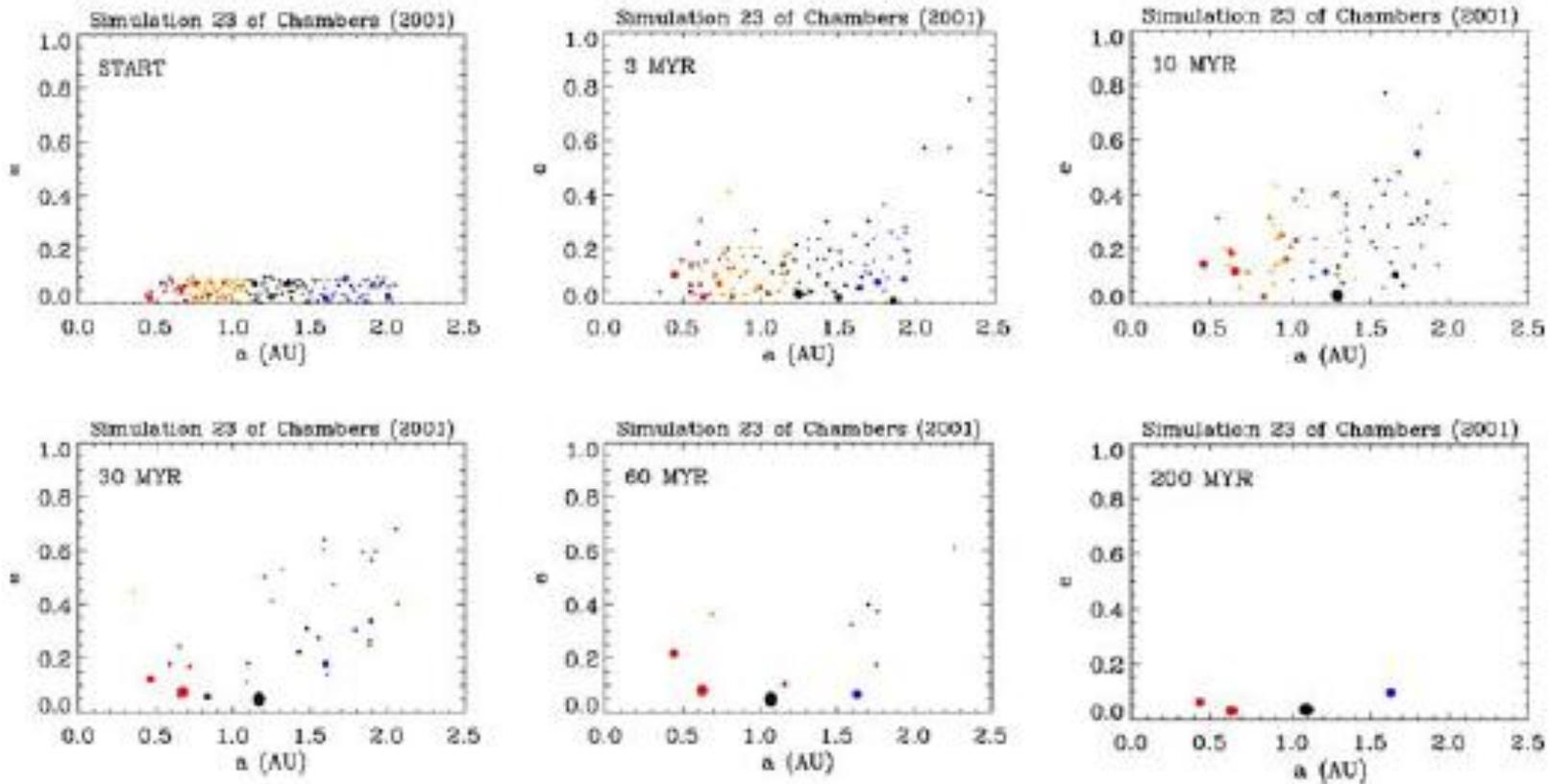
(Montmarle, Th. et al., *Earth, Moon and Planets*, 2006)



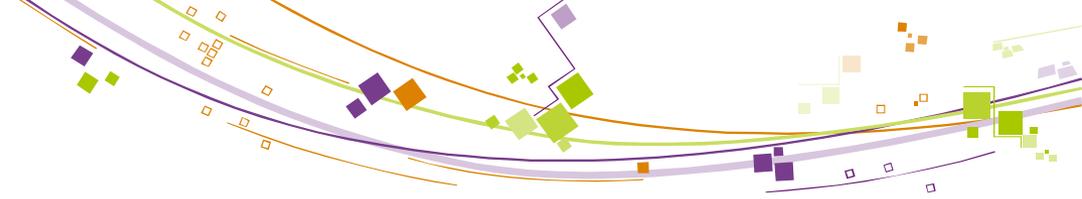
Figure 3.14. The center of the Orion nebula cluster. *Left:* near-IR image (this is the same as Figure 3.3). *Right:* corresponding X-ray image by Chandra (Getman et al., 2005). Note the excellent identification between the IR and X-ray sources, demonstrating that all young stars emit X-rays at levels much higher than the Sun.

■ Que savons nous de la formation des planètes?

(Montmarle, Th. et al., *Earth, Moon and Planets*, 2006)

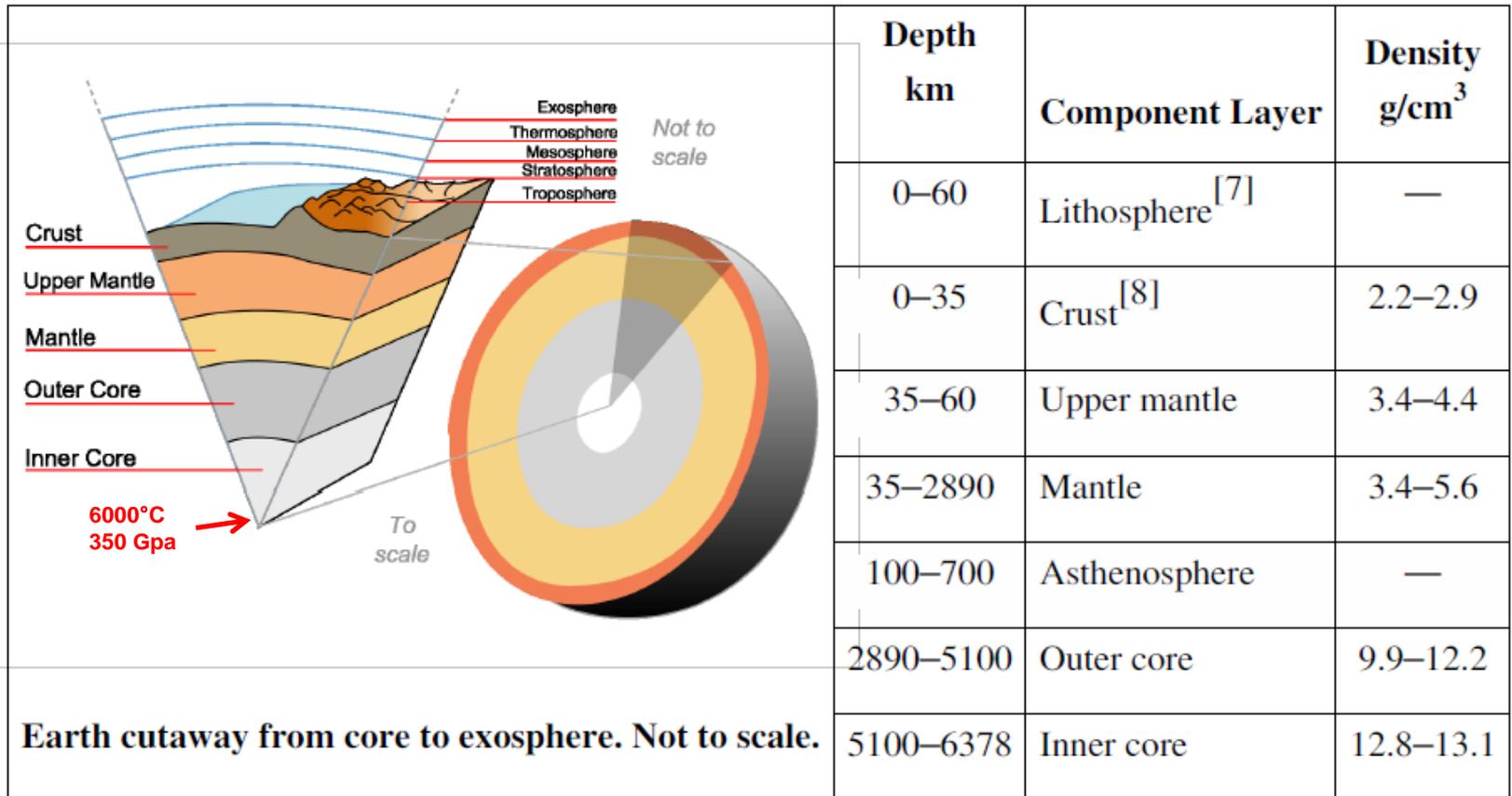


- ~100 Ma pour la croissance de planètes terrestres par agrégation d'embryons planétaires (simulations SPH)

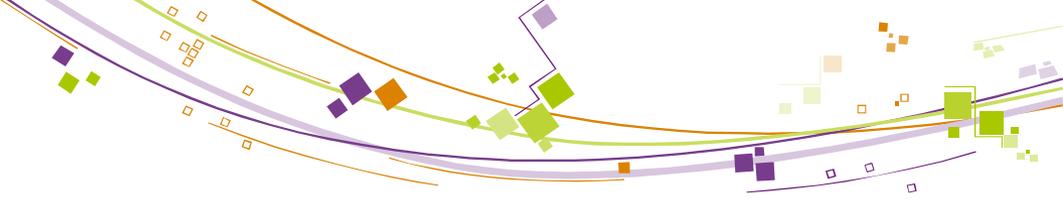


■ Que savons nous de la composition de la Terre ?

(<http://en.wikipedia.org/wiki/Earth>)



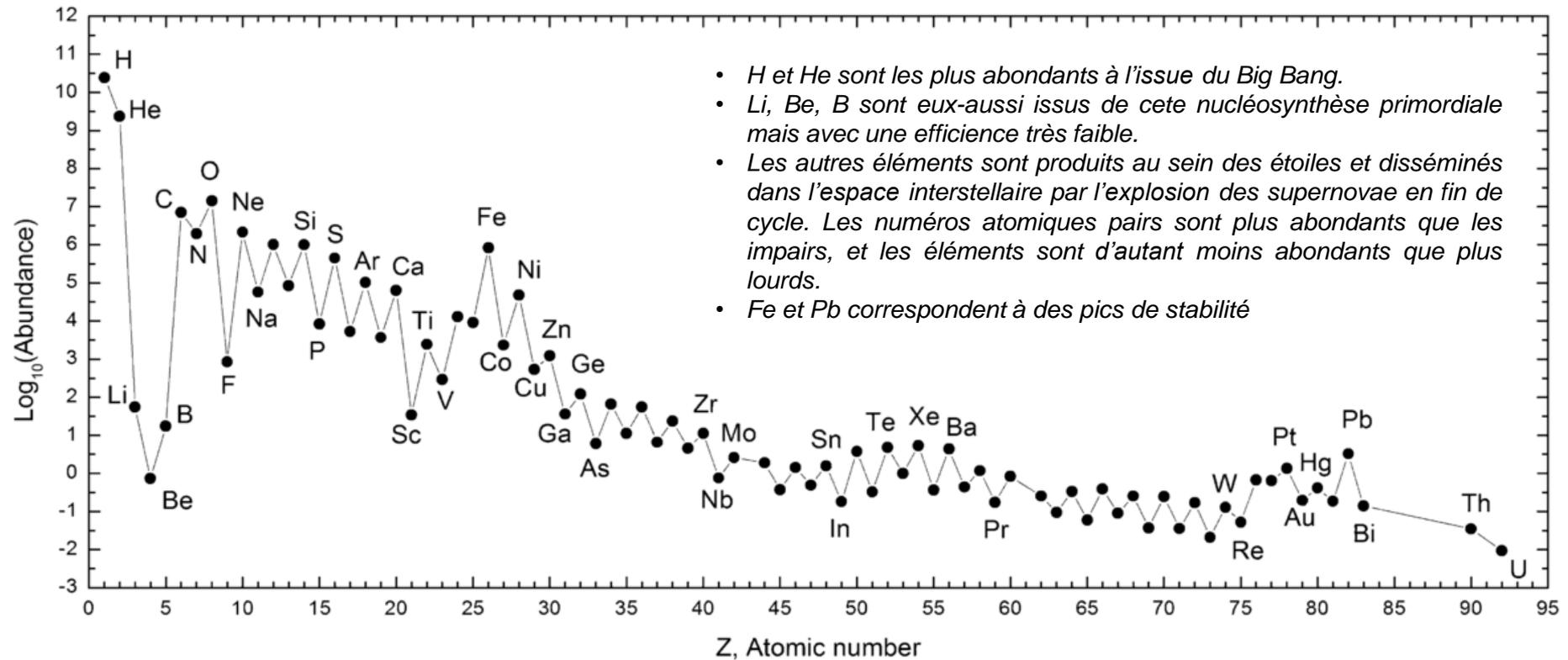
- Seule la lithosphère est à ce jour accessible à l'analyse chimique



■ Quel phénomène gère l'abondance relative des éléments sur Terre ?

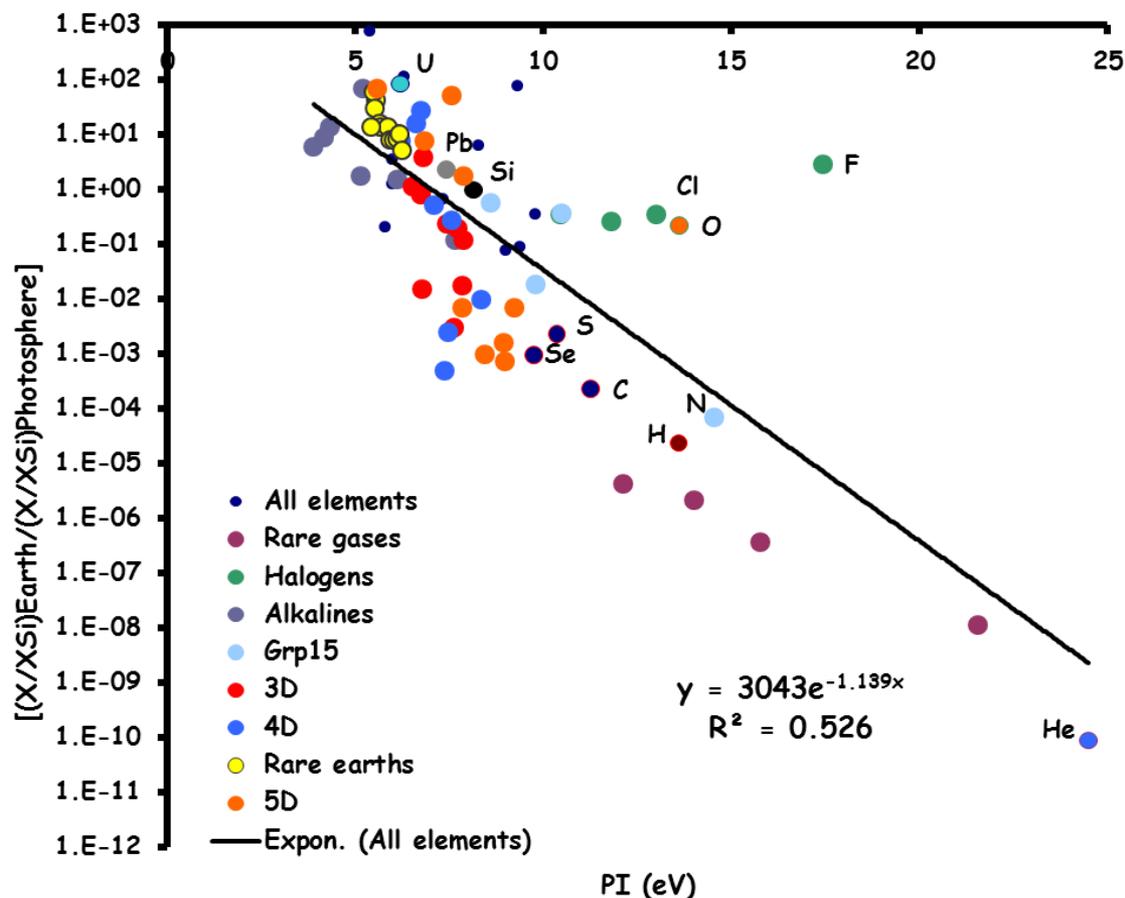
Abondances relatives des éléments dans le Système Solaire.

(http://en.wikipedia.org/wiki/Abundance_of_the_chemical_elements)



- H et He sont les plus abondants à l'issue du Big Bang.
- Li, Be, B sont eux-aussi issus de cette nucléosynthèse primordiale mais avec une efficacité très faible.
- Les autres éléments sont produits au sein des étoiles et disséminés dans l'espace interstellaire par l'explosion des supernovae en fin de cycle. Les numéros atomiques pairs sont plus abondants que les impairs, et les éléments sont d'autant moins abondants que plus lourds.
- Fe et Pb correspondent à des pics de stabilité

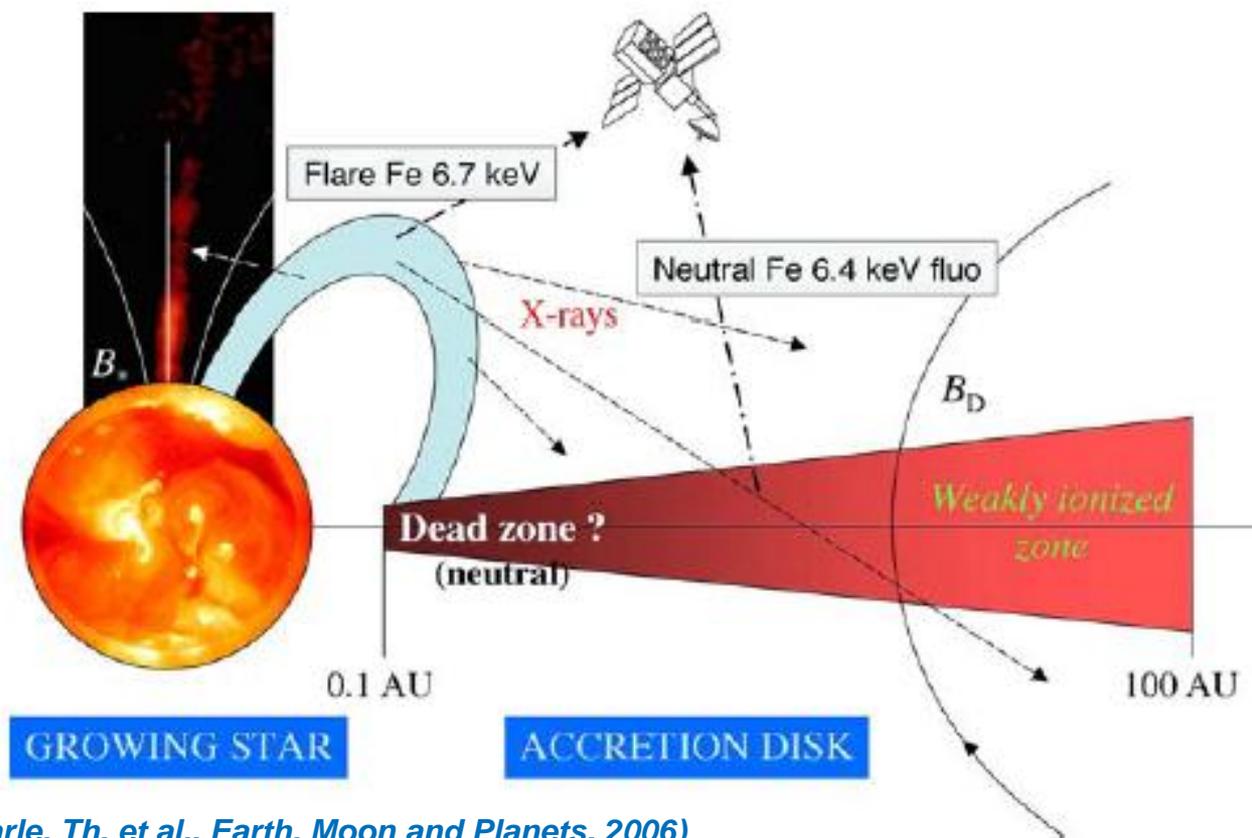
■ Quel phénomène gère l'abondance relative des éléments sur Terre ?



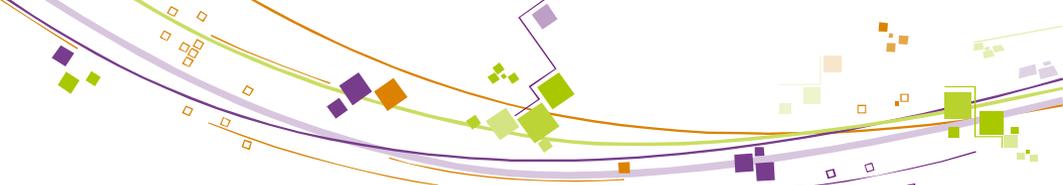
- Les abondances relatives sont ici mesurées pour l'ensemble seul accessible lithosphère+hydrosphère+atmosphère.
- Dans cette représentation elles sont normalisées par rapport aux abondances relatives dans la photosphère
- La Terre témoigne donc, comme les autres planètes telluriques (Mercure, Vénus, La Lune, Mars) d'une différenciation chimique très marquée.
- Une corrélation est observée avec le premier potentiel d'ionisation (FPI) des atomes

■ Une théorie nouvelle...

(Toulhoat, H. et al., 2014, Soumis à CRAS Géosciences)



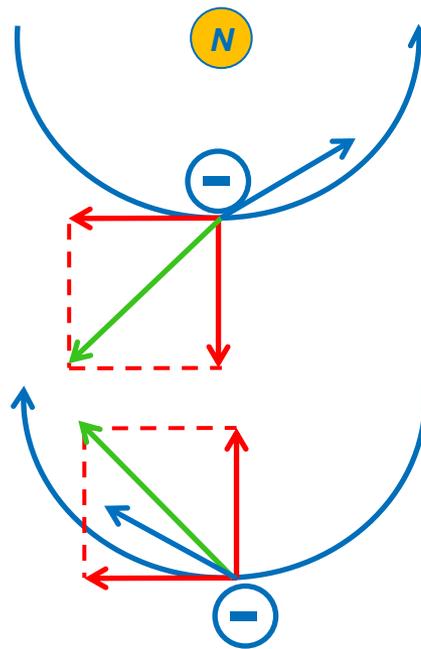
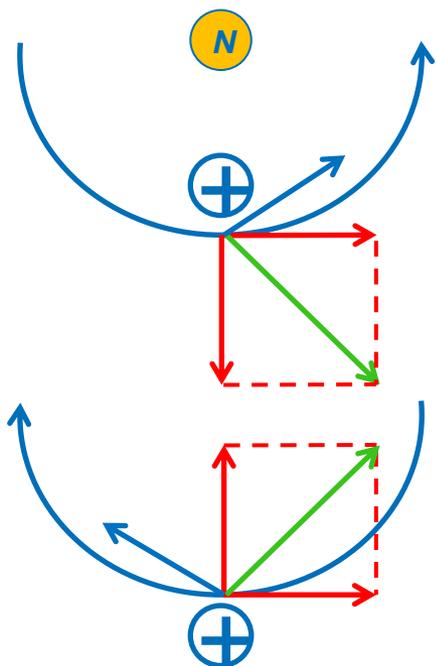
(Montmarle, Th. et al., Earth, Moon and Planets, 2006)



■ Une théorie nouvelle...

(Toulhoat, H. et al., 2014, Soumis à CRAS Géosciences)

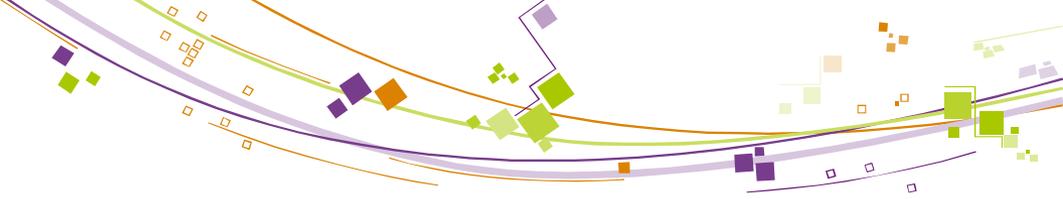
L'ionisation crée une force de Lorentz qui, pour un sens de rotation, bloque le transfert de moment angulaire et donc maintient en orbite de Kepler à la distance d une certaine fraction des atomes ionisés et les électrons associés



Force de Lorentz résultante répulsive

Force de Lorentz résultante attractive

- **La force de Lorentz résultante brise la symétrie en sélectionnant le sens de rotation des ions retenus à la distance d**
- **Toutes les planètes du système solaire orbitent dans le même sens**



■ Une théorie nouvelle...

(Toulhoat, H. et al., 2014, Soumis à CRAS Géosciences)

Ordre de grandeur du rapport ρ de la force de Lorentz à la force de gravité

$$\| \quad (\quad) \| \quad \text{—} \quad \| \quad \| \quad \| \quad (\quad) \| \quad \| \quad (\quad) \|$$

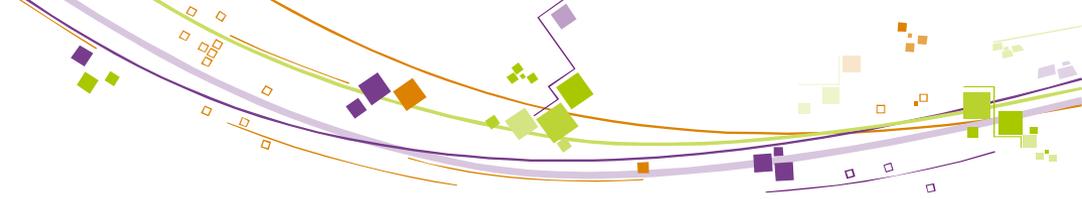
Avec:

$$\left(\quad \right) \quad \left(\quad \left[\quad \right] \right)$$



A l'échelle microscopique, les forces électromagnétiques dominent les forces de gravité...

@ FU Orionis, 1kG à 0.05 A.U. par effet Zeeman, et 32 +/- 8 G selon la ligne de visée
 Donati et al., « Direct detection of a magnetic field in the innermost region of an accretion disk », Nature 04253, Nov 2008



■ Une théorie nouvelle...

(Toulhoat, H. et al., 2014, Soumis à CRAS Géosciences)

$$\left(\frac{X^+}{X_{SS}} \right) \left(M \right) = \exp \left(\frac{-IP \left(M \right)}{k_B T_{elG} (d)} \right) \quad \text{Fraction ionisée de l'élément } M \text{ à la distance } d \quad (1)$$

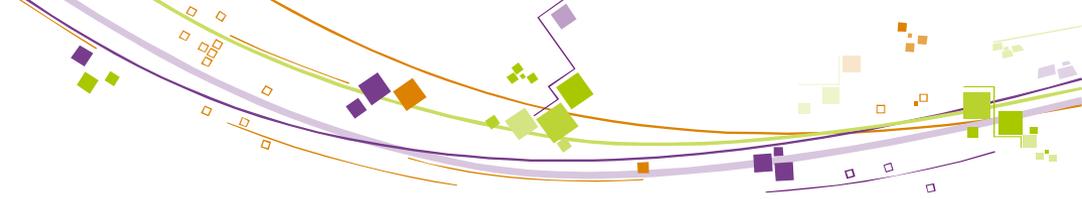
$$\Omega \left(d \right) = \pi \left(\frac{R_{PS}}{d} \right)^2 \quad (2) \quad \text{Angle solide sous lequel est vu le protosoleil à une distance } d$$

$$k_B T_G \left(d \right) = k_B T_{elG} \left(d \right) \pi \left(\frac{R_{PS}}{d} \right)^2 \quad (3) \quad \text{Thermalisation du gaz à la distance } d$$

(le flux d'énergie transmis par les photons aux électrons est intégralement dissipé en énergie cinétique locale des atomes)

$$\frac{\left(\frac{X}{X_{Si}} \right)}{\left(\frac{X}{X_{Si}} \right)_{SS}} (d, M) = \exp \left(\frac{- \left(P \left[M \right] + IP \left[Si \right] \right)}{k_B T_G \left(d \right)} \pi \left(\frac{R_{PS}}{d} \right)^2 \right) = f_V \left(M, d \right) \quad (7)$$

Loi de différenciation chimique locale:
s'applique aux planètes pour leur composition moyenne

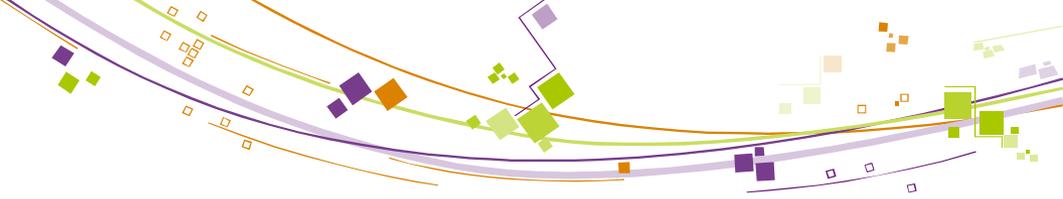


■ Une théorie nouvelle...

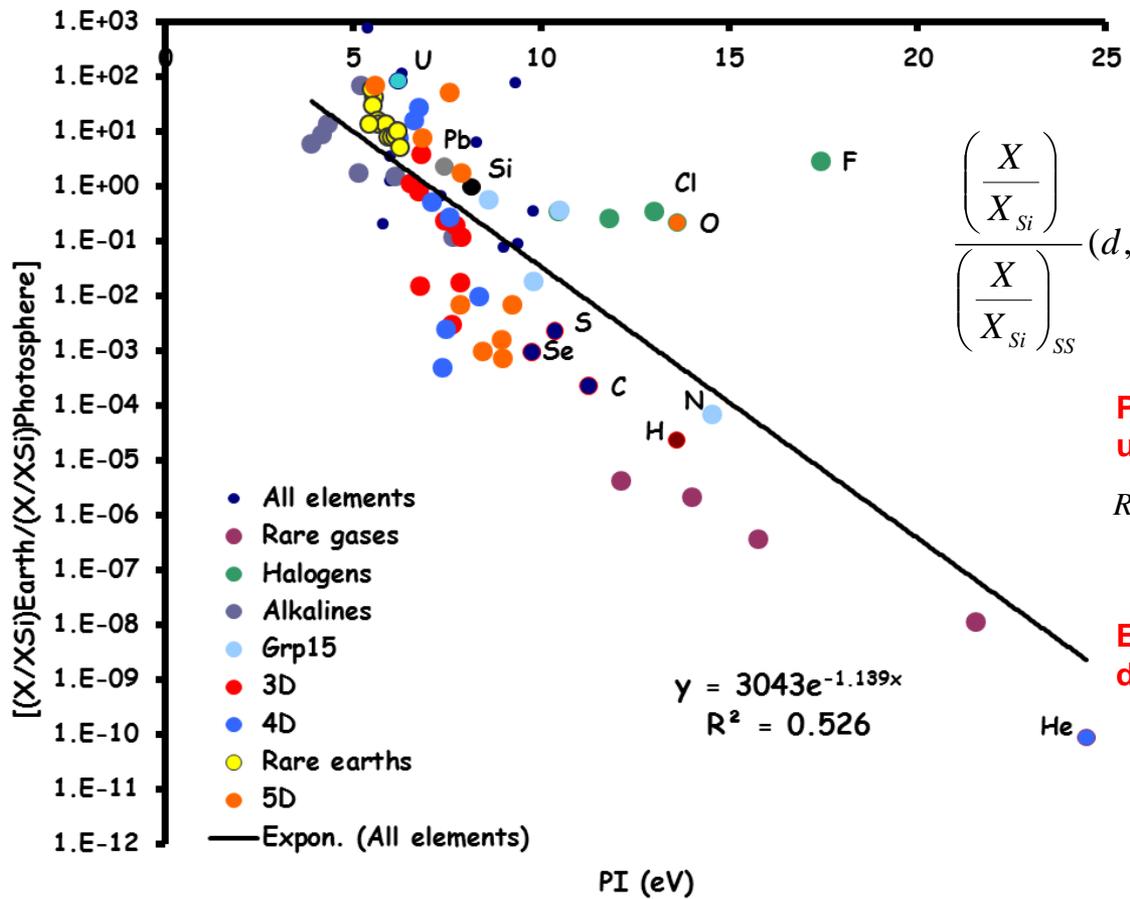
(Toulhoat, H. et al., 2014, Soumis à CRAS Géosciences)

- Trois hypothèses.
- T_{CBP} = température actuelle du fond cosmique supposée peu différente de celle qui prévalait à l'origine du système solaire
- R_{PS} = Rayon du protosoleil , R_S = rayon du soleil actuel

$$\frac{(\quad)}{(\quad)} \quad \left\{ \begin{array}{l} (-) \\ (-) \end{array} \right\}$$



■ Quel phénomène gère l'abondance relative des éléments sur Terre ?



$$\frac{\left(\frac{X}{X_{Si}}\right)}{\left(\frac{X}{X_{Si}}\right)_{SS}}(d, M) = \exp\left(\frac{-|IP[M] - IP[Si]|}{k_B T_G |d|} \pi \left(\frac{R_{PS}}{d}\right)^2\right)$$

Pour la Terre, la loi obtenue prévoit une pente de -1.146 eV⁻¹ avec :

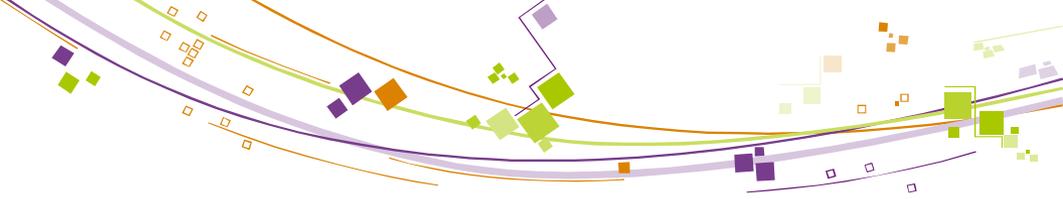
$$R_{PS} = 2R_S = 0.00928 \text{ A.U.}$$

()

En très bon accord avec celle de la droite de régression en semi-log

$$y = 3043e^{-1.139x}$$

$$R^2 = 0.526$$

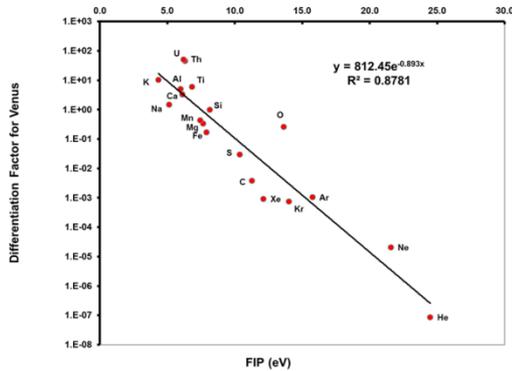


... Testée vis à vis des données des sondes spatiales!

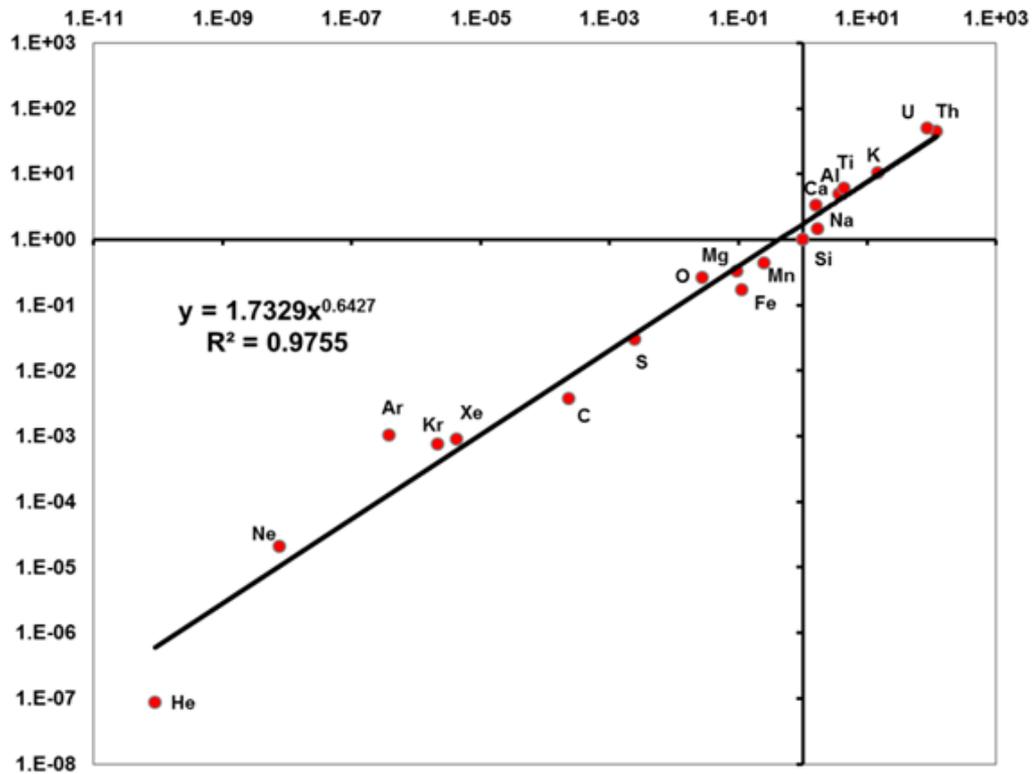
(Toulhoat, H. et al., 2014, Soumis à CRAS Géosciences)

$$\left(\frac{X}{X_{Si}}\right)_{(d,M)} = \exp\left(-\frac{IP[Si]}{k_B T_G} \pi \left(\frac{R_{PS}}{d}\right)^2\right) = f_V$$

$$\left(\frac{X}{X_{Si}}\right)_{SS} = \left(\frac{X}{X_{Si}}\right)_{(d,M)} \left(\frac{f_E}{f_V}\right)$$

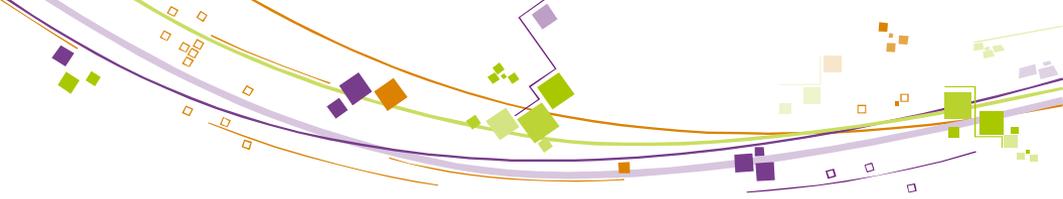


Differentiation Factor for Venus



Differentiation factor for Earth

Données de composition chimique de la surface de **Vénus** résultant des missions Venera et Vega

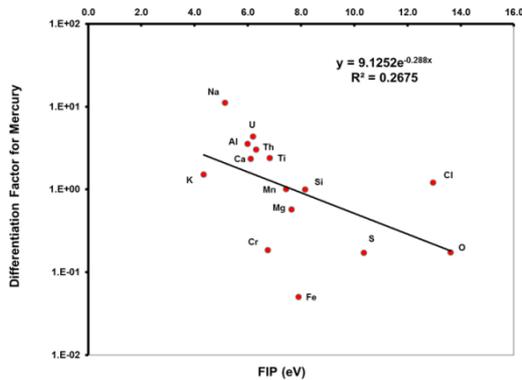


...Testée vis à vis des données des sondes spatiales!

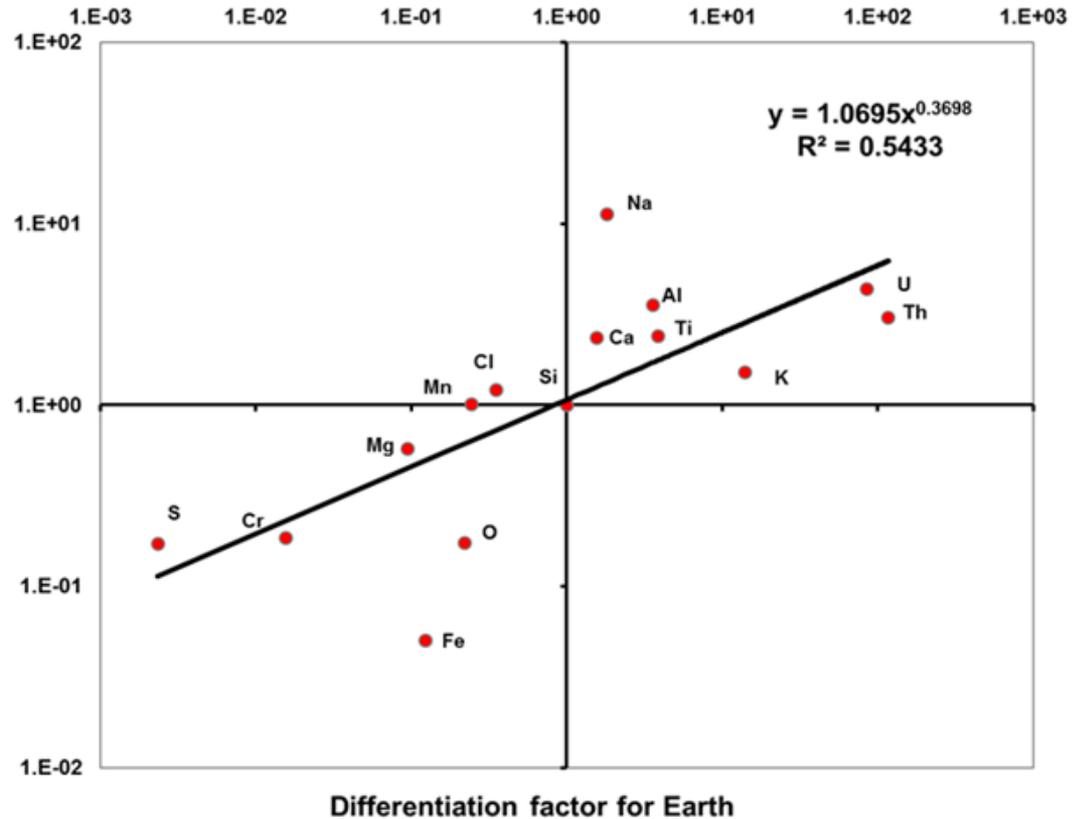
(Toulhoat, H. et al., 2014, Soumis à CRAS Géosciences)

$$\left(\frac{X}{X_{Si}}\right)_{SS} (d, M) = \exp\left(\frac{-|IP[M]| - IP[Si]}{k_B T_G |d|} \pi \left(\frac{R_{PS}}{d}\right)^2\right)$$

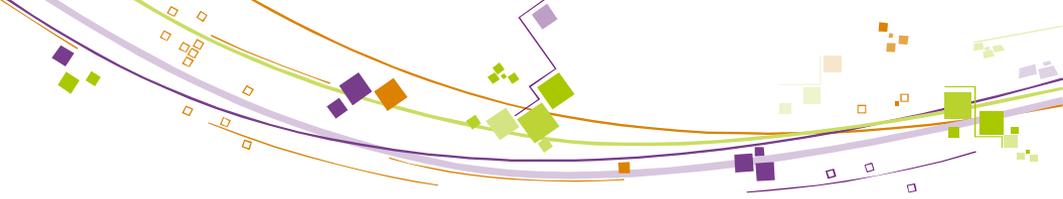
$\frac{(-)}{(-)}$



Differentiation Factor for Mercury



Données de composition chimique de la surface de **Mercury** résultant de la mission MESSENGER, publiées en 2011

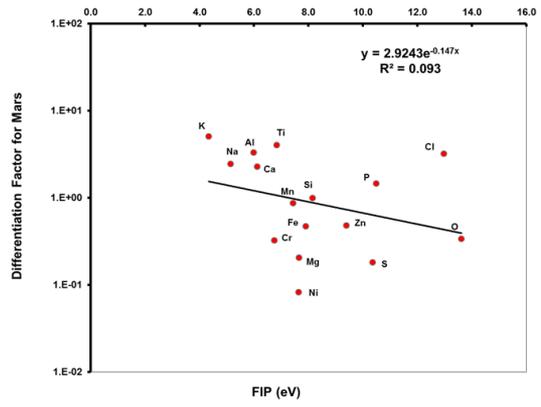


...Testée vis à vis des données des sondes spatiales!

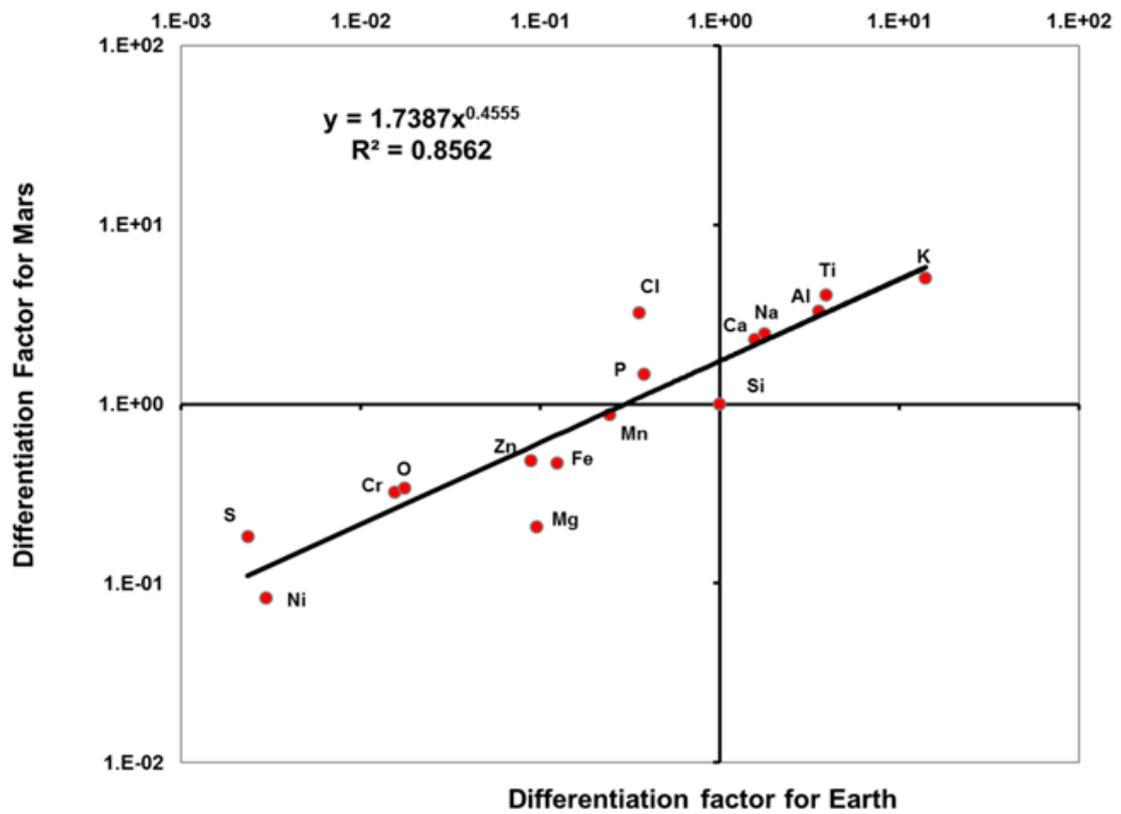
(Toulhoat, H. et al., 2014, Soumis à CRAS Géosciences)

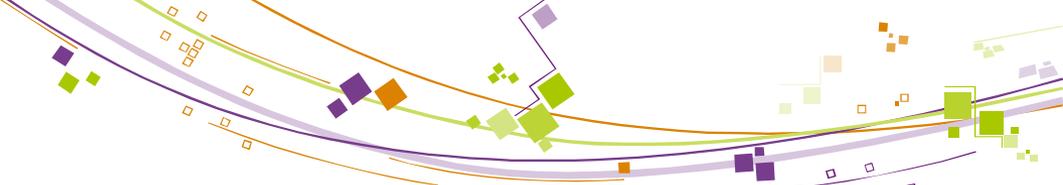
$$\left(\frac{X}{X_{Si}}\right)_{SS} (d, M) = \exp\left(\frac{-|IP[M] - IP[Si]|}{k_B T_G |d|} \pi \left(\frac{R_{PS}}{d}\right)^2\right)$$

$\frac{(-)}{(-)}$



Données de composition chimique de la surface de Mars résultant des missions Pathfinder et Spirit



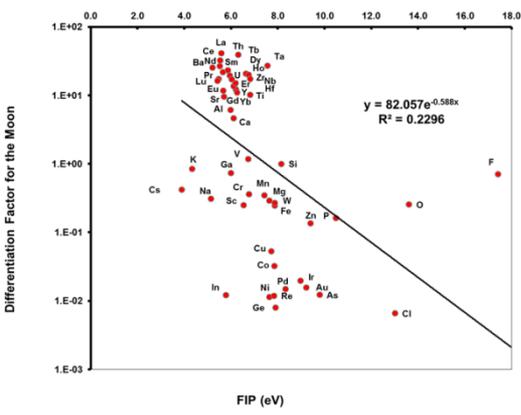


■ ...Testée vis à vis des données des sondes spatiales!

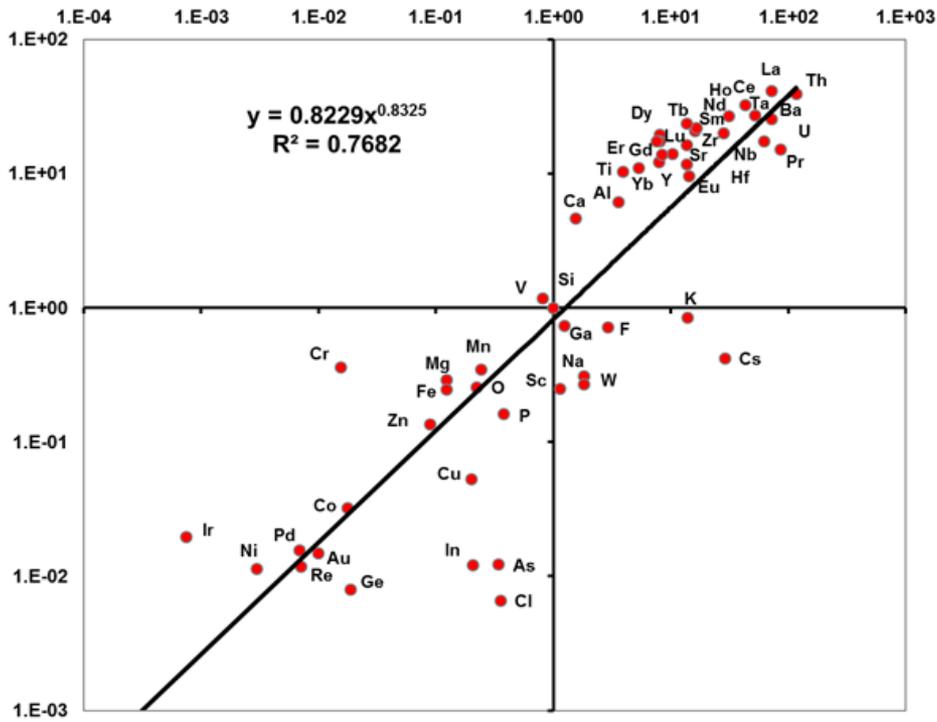
(Toulhoat, H. et al., 2014, Soumis à CRAS Géosciences)

$$\left(\frac{X}{X_{Si}}\right)_{SS} - \left(\frac{X}{X_{Si}}\right)_{M} = \exp\left(\frac{-|IP[M] - IP[Si]|}{k_B T_G |d|} \pi \left(\frac{R_{PS}}{d}\right)^2\right)$$

(-) (-)

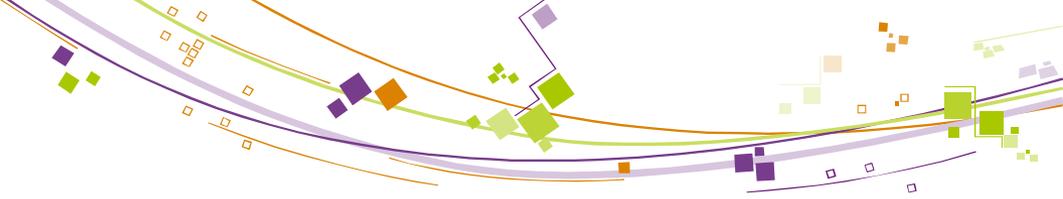


Differentiation Factor for the Moon



Differentiation factor for Earth

Données de composition chimique de la surface de **La Lune** résultant des missions Apollo 15, 16 et 17
 => **Lune formée à 1.096 A.U.**

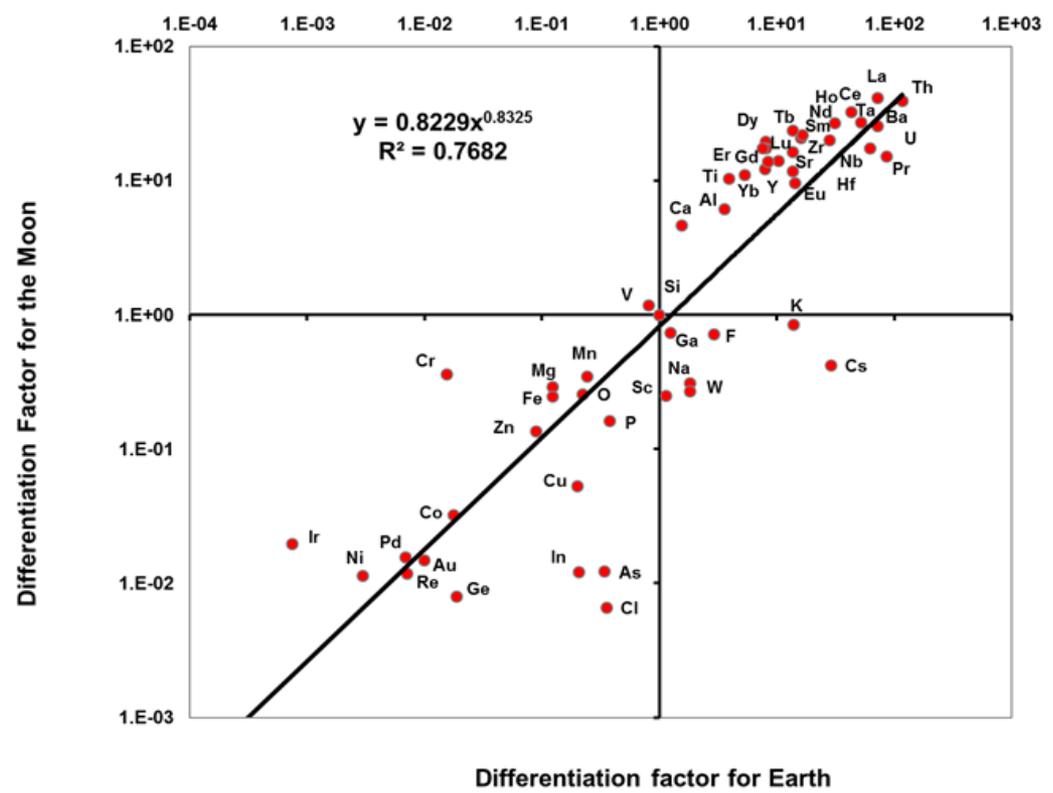
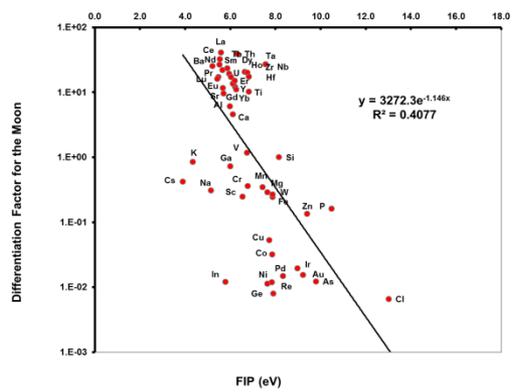


...Testée vis à vis des données des sondes spatiales!

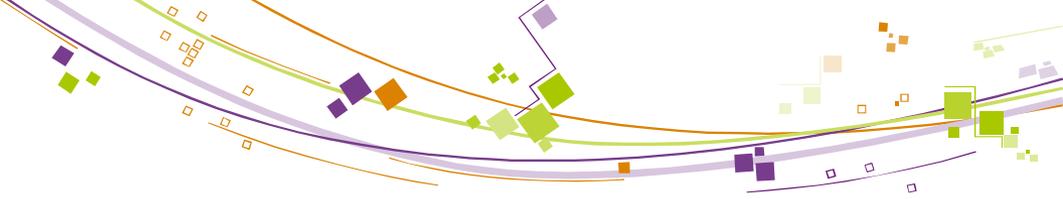
(Toulhoat, H. et al., 2014, Soumis à CRAS Géosciences)

$$\left(\frac{X}{X_{Si}}\right)_{SS} (d, M) = \exp\left(\frac{-|IP[M] - IP[Si]|}{k_B T_G |d|} \pi \left(\frac{R_{PS}}{d}\right)^2\right)$$

$\frac{(-)}{(-)}$



Données de composition chimique de la surface de **La Lune** résultant des missions Apollo 15, 16 et 17
 => **Lune formée à 1.096 A.U.**



■ ...Testée vis à vis des données des sondes spatiales!

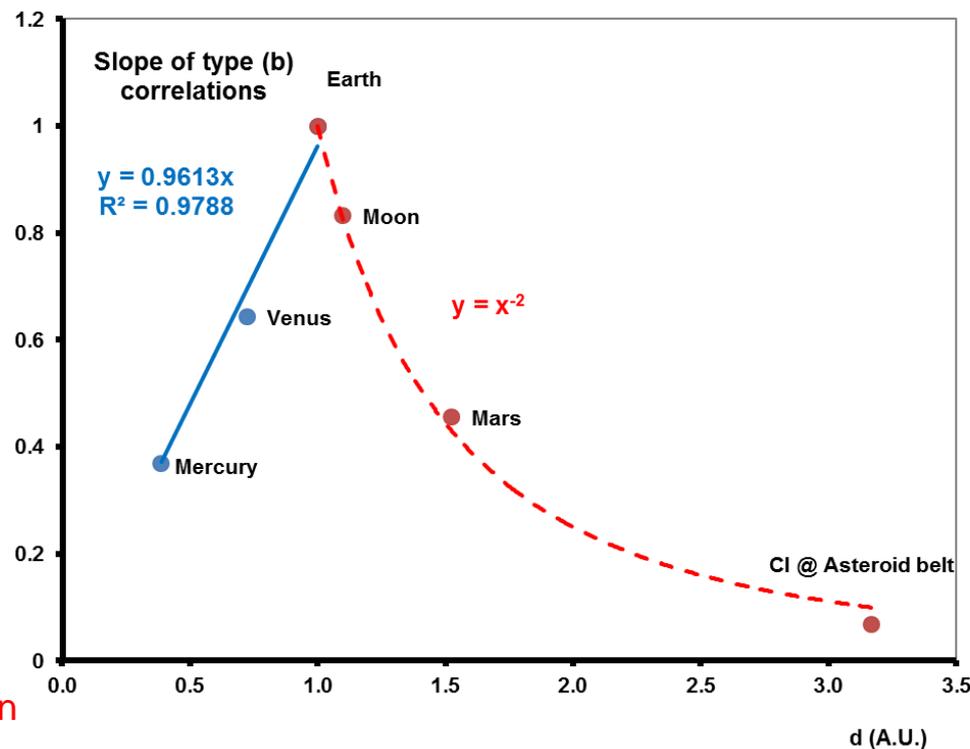
(Toulhoat, H. et al., 2014, Soumis à CRAS Géosciences)

L'exploitation des pentes λ permet de vérifier toutes les hypothèses:

$$\frac{(-)}{(-)}$$

$$\frac{(-)}{(-)}$$

$$\frac{(-)}{(-)}$$



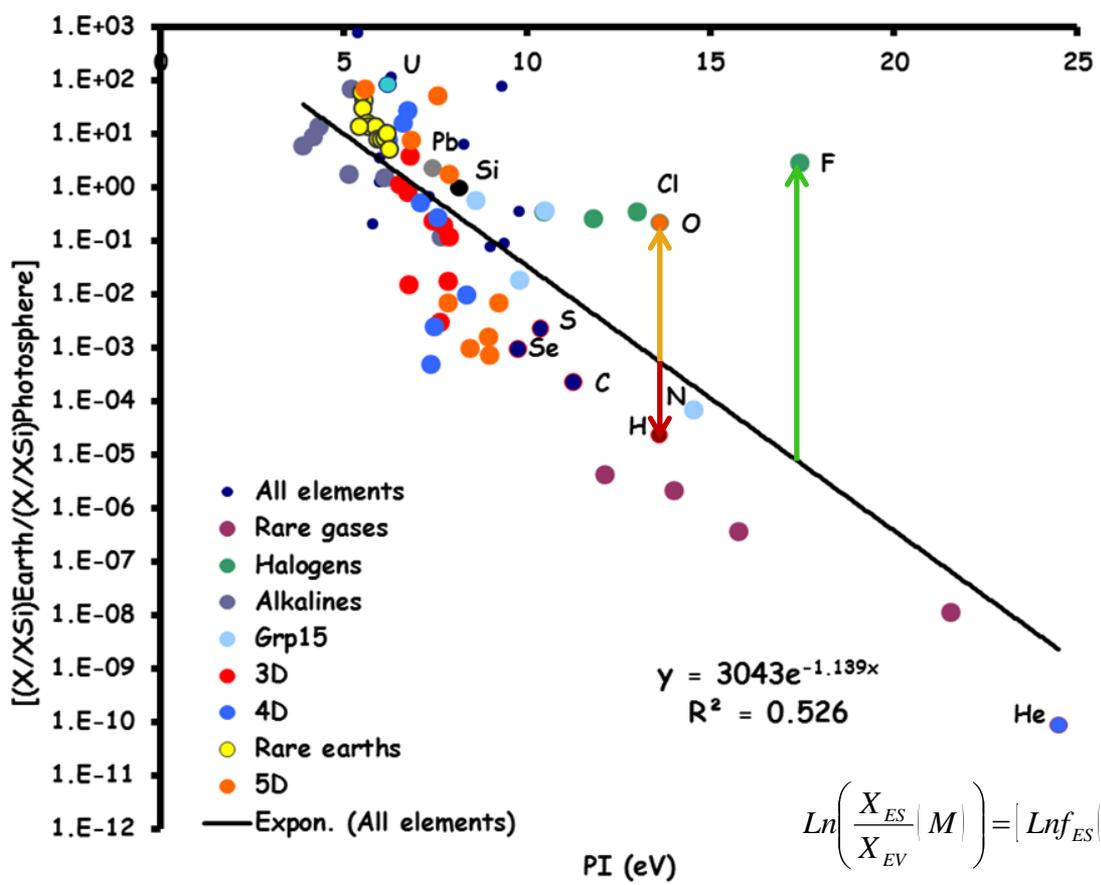
Conséquence importante: le protosoleil est bien un puissant émetteur de rayons X « mous »

$$\frac{(-)}{(-)}$$



■ Différenciation radiale des planètes: gravité et chimie

(Toulhoat, H. et al., 2014, Soumis à CRAS Géosciences)



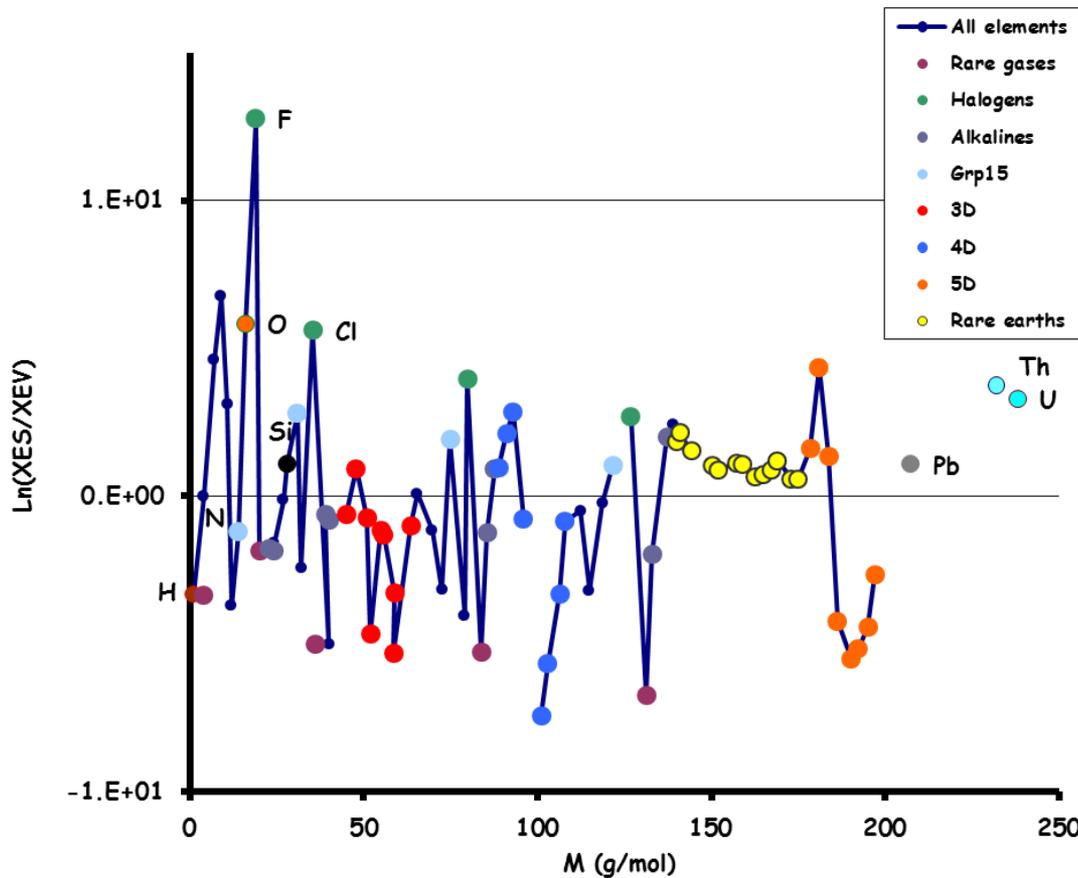
Les mesures sont faites en surface, la loi vaut pour le volume:

- Les écarts + traduisent un enrichissement en surface,
- les écarts - traduisent un enrichissement en volume
- La distance verticale d'un point à la droite théorique mesure un coefficient de partage Surface/volume

$$\ln\left(\frac{X_{ES}}{X_{EV}}\right) = \left[\ln f_{ES}(M) - \ln f_{EV}(M) \right] + \ln \left[\sum_M X_{ES}(M) \frac{f_{EV}(M)}{f_{ES}(M)} \right]$$

■ Différenciation radiale des planètes: gravité et chimie

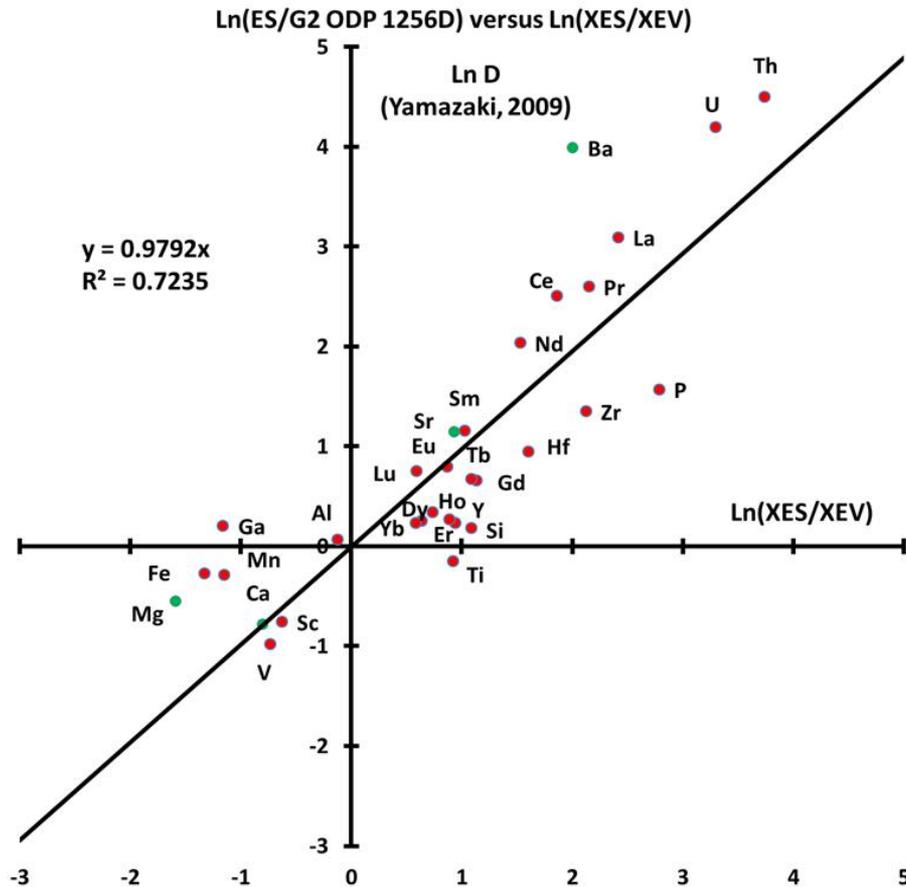
(Toulhoat, H. et al., 2014, Soumis à CRAS Géosciences)



Les coefficients de partage observés pour la Terre témoignent d'une forte cohérence chimique

■ Différenciation radiale des planètes: gravité et chimie

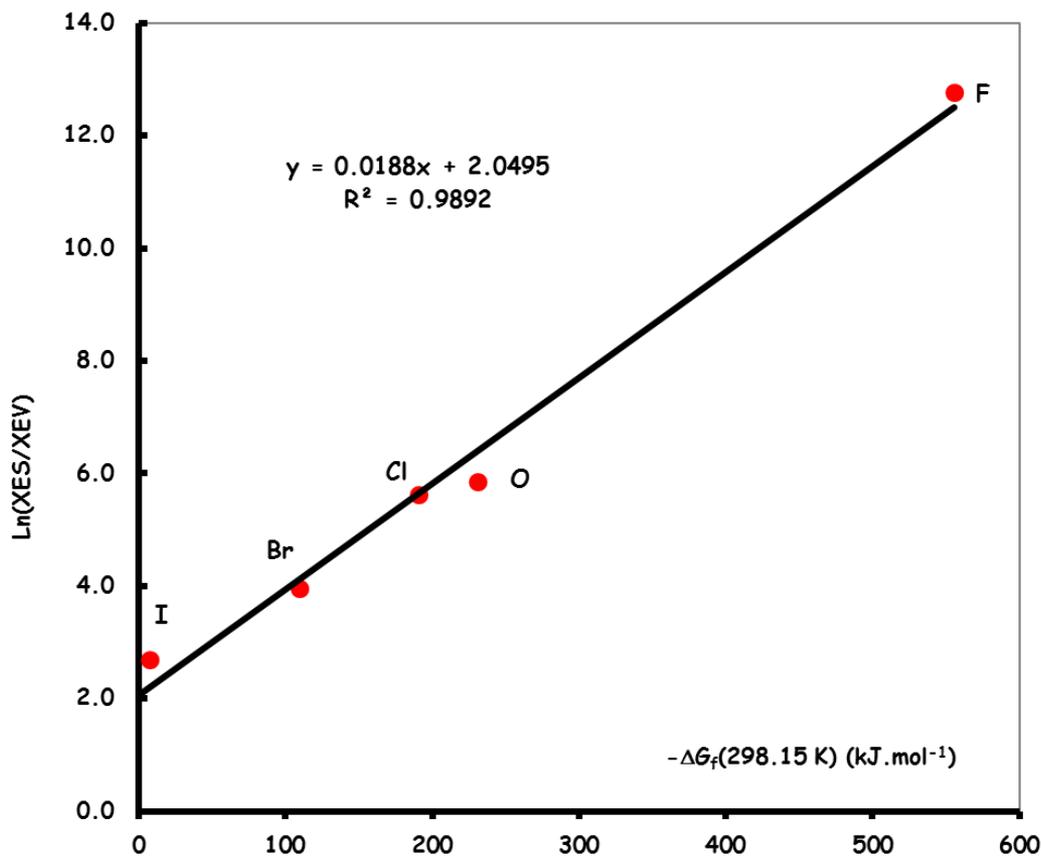
(Toulhoat, H. et al., 2014, Soumis à CRAS Géosciences)



Le Gabbro G2, échantillonné dans une croûte océanique jeune (15 Ma) à -1500 m sous le plancher océanique présente une composition chimique conforme à notre prédiction pour l'intérieur du globe (en excluant O et les alcalins IA: Na, K, Rb, Cs, dont les gros ions monovalents sont exclus des sites de coordination des oxydes et notamment de silicates)

■ Différenciation radiale des planètes: gravité et chimie

(Toulhoat, H. et al., 2014, Soumis à CRAS Géosciences)



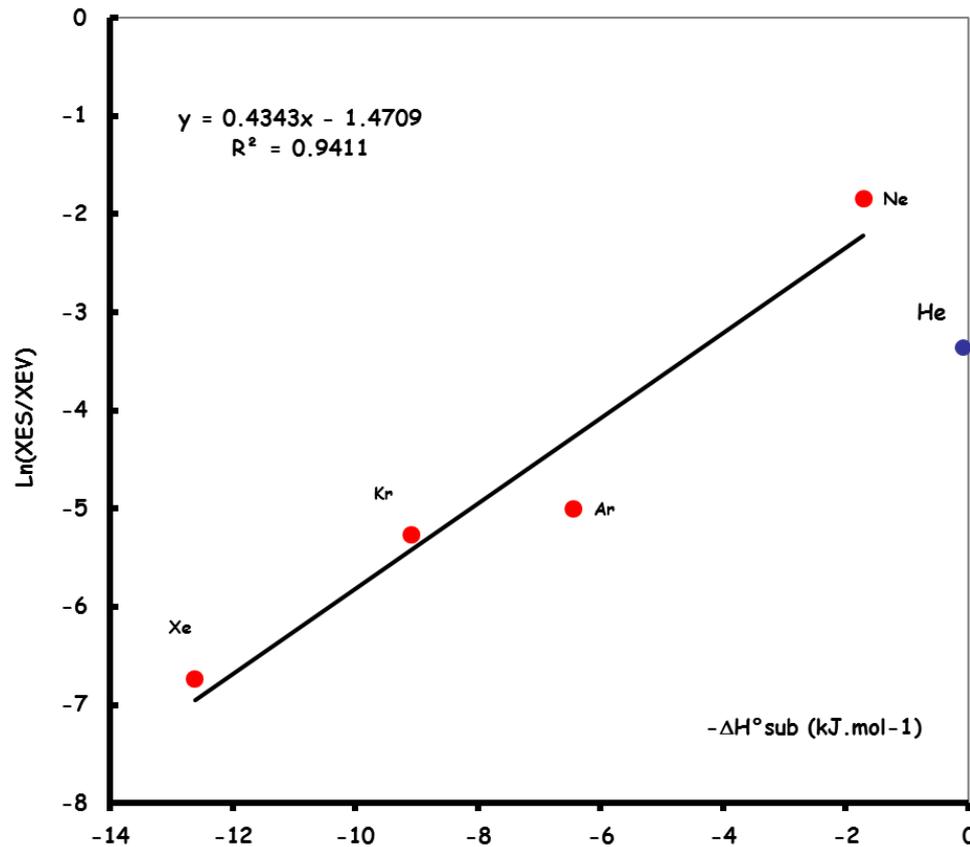
Les coefficients de partage de O et des halogènes, les éléments les plus électronégatifs, sont parfaitement corrélés à l'enthalpie libre standard de formation des hydrides (H_2O , HF, HCl, HBr, HI)

Ceci suggère un processus de différenciation radiale de la Terre contrôlé par le flux centrifuge d' H_2 qui doit s'être établi du fait de l'instabilité de cette molécule dans le champ de gravité terrestre en surface: une véritable chromatographie réactive aurait concentré l'oxygène dans la lithosphère, l'atmosphère la l'hydrosphère.

Ce processus explique la teneur élevée des océans en halogénures alcalins, (NaCl, etc...)

■ Différenciation radiale des planètes: gravité et chimie

(Toulhoat, H. et al., 2014, Soumis à CRAS Géosciences)



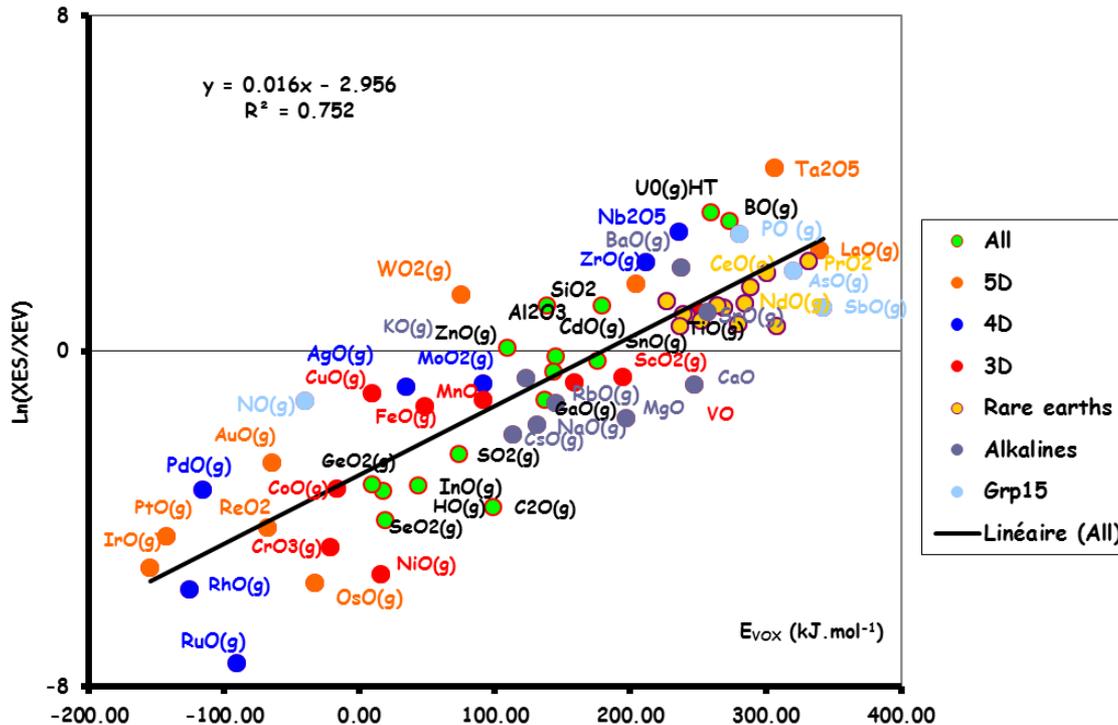
Les coefficients de partage des gaz rares sont corrélés à leur enthalpie standard de sublimation, elle-même dépendant au premier ordre de leur masse atomique

Ceci suggère un processus de différenciation dominé par la gravité pour ces éléments non réactifs

He est susceptible d'avoir en partie diffusé vers l'espace (effet Jeans) comme H.

■ Différenciation radiale des planètes: gravité et chimie

(Toulhoat, H. et al., 2014, Soumis à CRAS Géosciences)

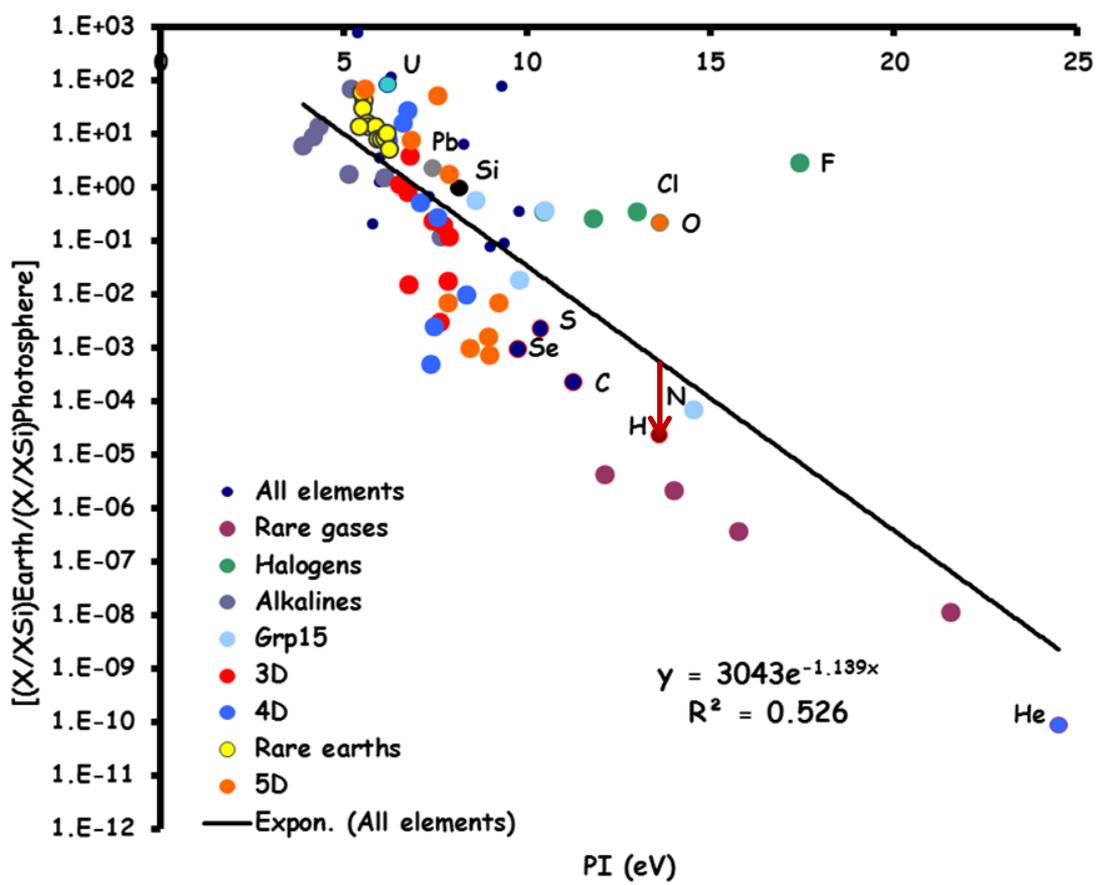


Les coefficients de partage de tous les autres éléments sont corrélés à l'enthalpie libre de formation de leurs oxydes à une température voisine de 4000 K

Ceci suggère une différenciation radiale contrôlé par le gradient de potentiel chimique en O préétabli par le flux centrifuge d'H₂

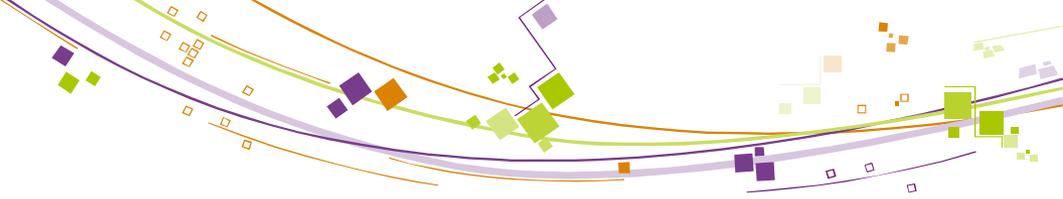
■ Et l'hydrogène naturel ?

(Toulhoat, H. et al., 2014, Soumis à CRAS Géosciences)



Il est à l'intérieur....

Comme C, S, Les alcalins IA, la majorité des éléments de transition, les gaz rares...



■ Et l'hydrogène naturel ?

(Toulhoat, H. et al., 2014, Soumis à CRAS Géosciences)

Element	wt %	mol %
H	1.830E+01	87.43
He	1.856E-05	<0.01
B	4.220E-05	<0.01
C	7.550E-01	0.30
N	5.562E-03	<0.01
O	1.391E-01	0.04
F	1.260E-07	<0.01
Ne	2.675E-06	<0.01
Na	1.341E+01	2.81
Mg	1.389E+01	2.75
Al	8.769E+00	1.57
Si	9.028E+00	1.55
P	5.715E-03	<0.01
S	3.793E-01	0.06
Cl	4.210E-04	<0.01
Ar	1.883E-04	<0.01
K	3.760E+00	0.46
Ca	8.792E+00	1.06
Sc	3.601E-03	<0.01
Ti	2.100E-01	0.02
V	2.329E-02	<0.01
Cr	1.046E+00	0.10
Mn	4.518E-01	0.04
Fe	1.942E+01	1.67
Co	6.153E-02	0.01
Ni	1.627E+00	0.13
Balance	1,00E+02	100

Il est à l'intérieur....

Encore probablement en quantités astronomiques, $\sim 3 \cdot 10^{12}$ GT... dont moins de 1% représentent déjà en TEP plus de 3 Gans de consommation mondiale 2010 d'énergie primaire

En partie combiné sous forme d'hydrures d'alcalins et de métaux de transition (principalement Fe, Ni dans le noyau, dont la densité devient alors plus compatible avec les mesures géophysiques)

Il a tendance à s'échapper = une explication des flux d' H_2 naturel observés



Conclusions

- Une théorie originale de la différenciation chimique de la nébuleuse protoplanétaire...
- Testée avec succès sur les données disponibles de composition chimique moyenne de la surface des planètes terrestres...
- Donnant en conséquence accès quantitativement aux coefficients de partage surface/volume des éléments...
- Révélant des phénomènes de différenciation radiale contrôlés par les propriétés chimiques et physiques des éléments...
- Offrant un pouvoir explicatif de nombreux phénomènes en géosciences...
- Bouleversant notre perception de la composition du globe interne, révélant notamment la dominance de l'hydrogène sous forme d'hydrures...
- Susceptible d'expliquer l'origine des flux d'H₂ naturel observés...
- Peut-être une nouvelle réserve gigantesque d'énergie primaire « propre »...
- **Des questions centrales pour l'humanité.**



Innovater les énergies

www.ifpenergiesnouvelles.fr