

# Propriétés thermiques des milieux granulaires et applications à l'imagerie thermique des surfaces planétaires

BLOT Alexis  
BOULESTEIX Vincent  
DEGURSE Jean-François

# PRÉSENTATION ET ANALYSE DES TRAVAUX SUR LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

# L'EXPLORATION PLANÉTAIRE

Les surfaces planétaires sont les témoins de l'histoire de la planète , en particulier la structure du sol nous renseigne sur plusieurs phénomènes :



Volcans, cratères d'impact ,mouvement de fluides en surface ...



Cratère Bonneville vu par le rover Spirit. Image : NASA/JPL

Deux vecteurs d'informations :



Observation directe : Atterrisseurs, Rovers

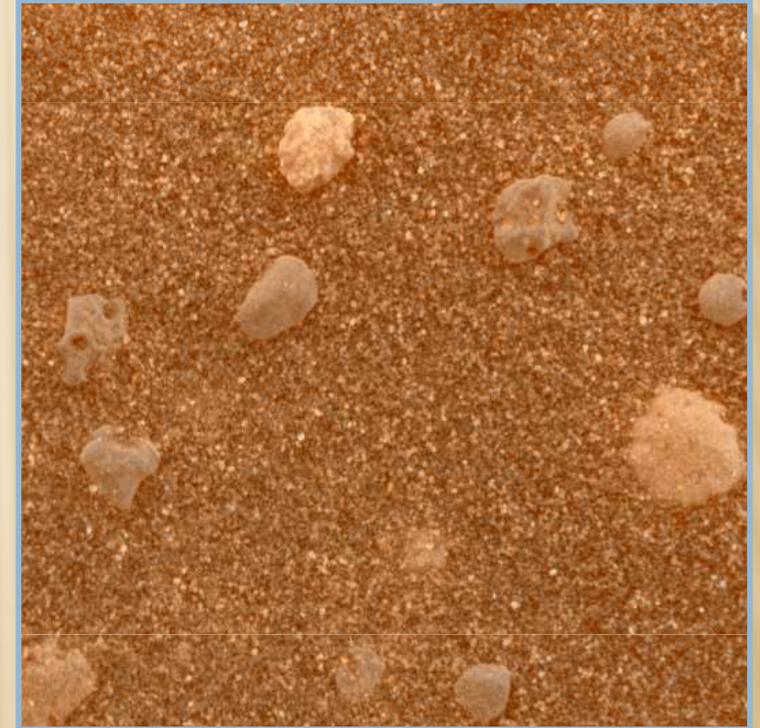


Observation indirecte : Satellites, télescopes...

# L'EXPLORATION SPATIALE



Rover Spirit (vue d'artiste)



Détermination : - du diamètre des grains grâce au microscope  
- de la densité du sol grâce à un pénétromètre

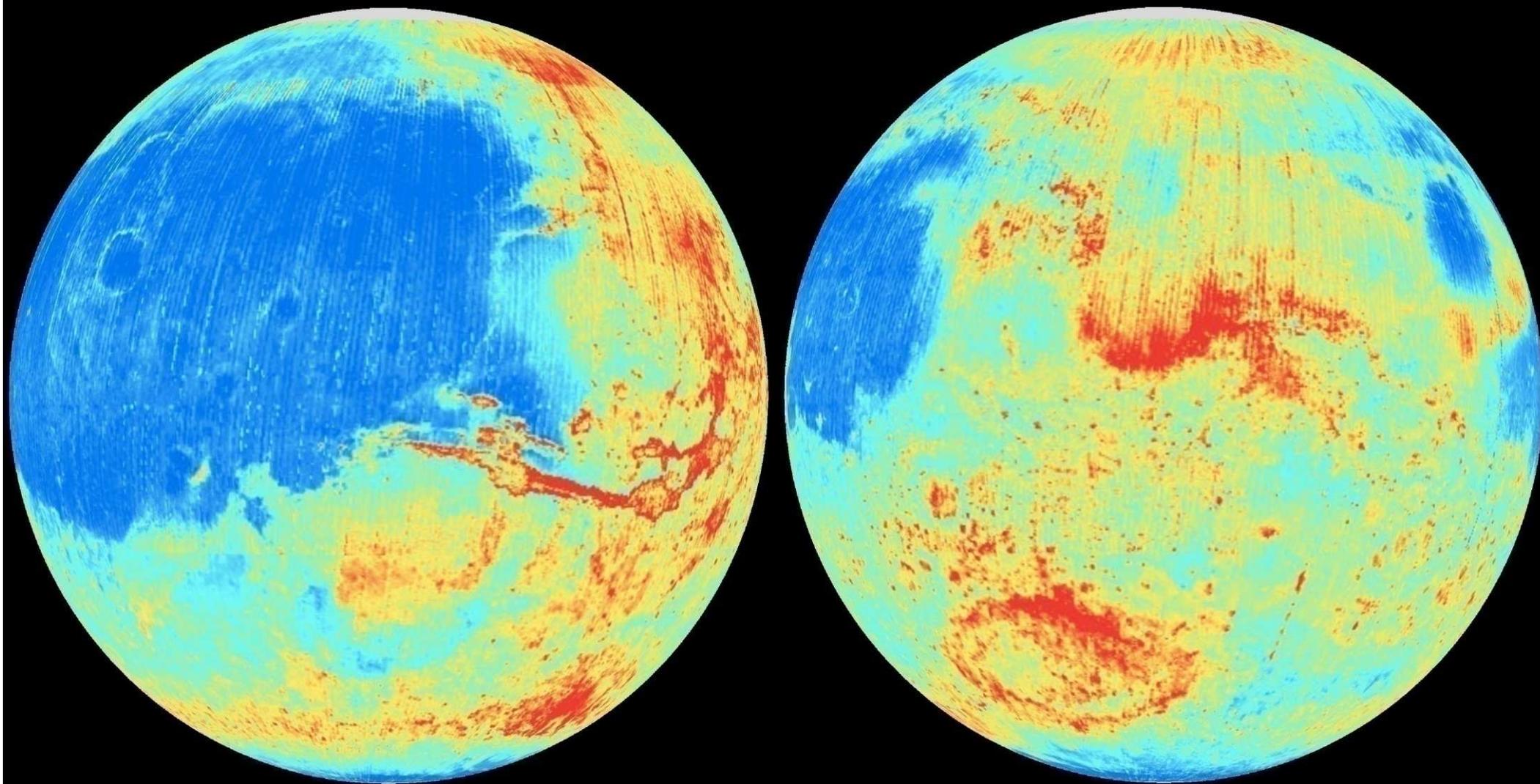
# L'EXPLORATION PLANÉTAIRE

Les sondes en orbite nous mesurent l'inertie thermique grâce à leur caméra infrarouge.

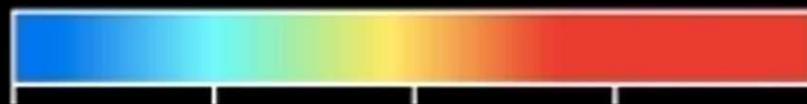
$$INERTIE\ THERMIQUE = \sqrt{K\rho C}$$

Une caméra infrarouge « TES » est embarquée à bord de Mars Global Surveyor





Thermal Inertia [ $\text{J/m}^2\text{K s}^{1/2}$ ]



24      218      412      606      800

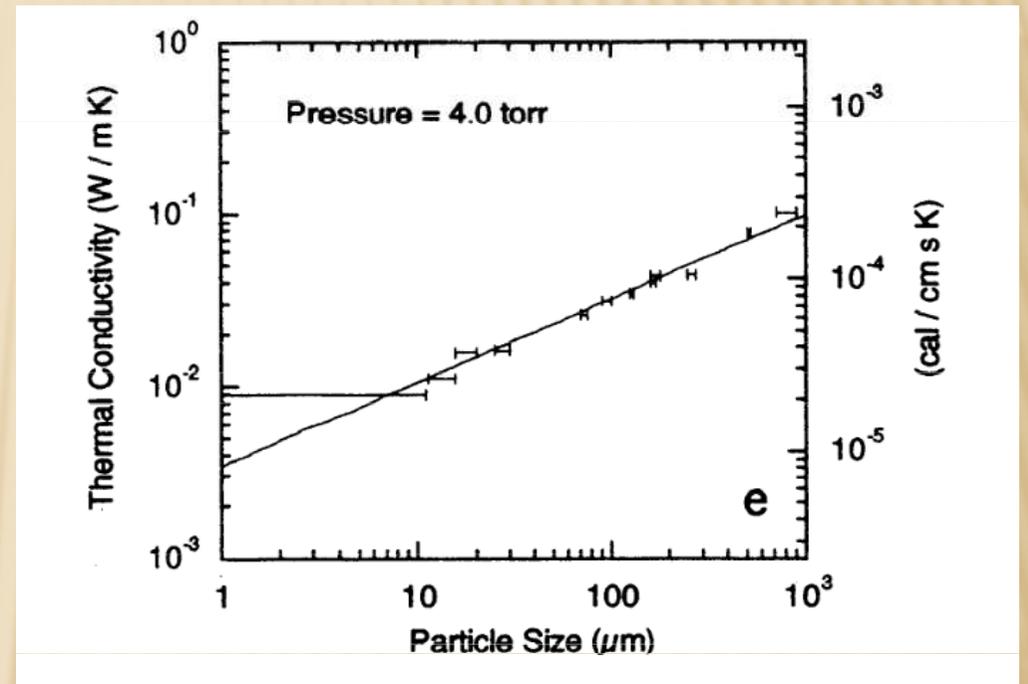
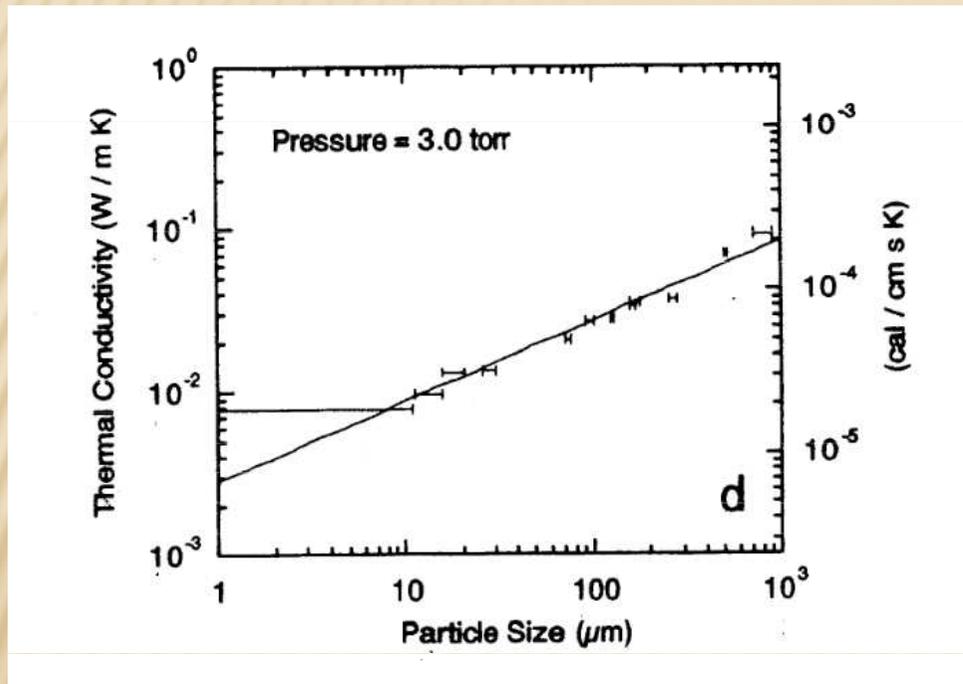
Image : NASA, Mars Global Surveyor

# L'EXPÉRIENCE DE PRESLEY

---

- Objectif :
- Mesure des conductivités thermiques en fonction de la taille des grains et de la pression
  - Trouver une relation entre diamètre des grains et conductivité thermique
  - Utiliser cette relation pour donner un sens aux données recueillies par les instruments THEMIS de Mars Odyssey et TES de Mars Global Surveyor
  - Analyse & compréhension de la structure du sol martien

# RÉSULTATS DE PRESLEY

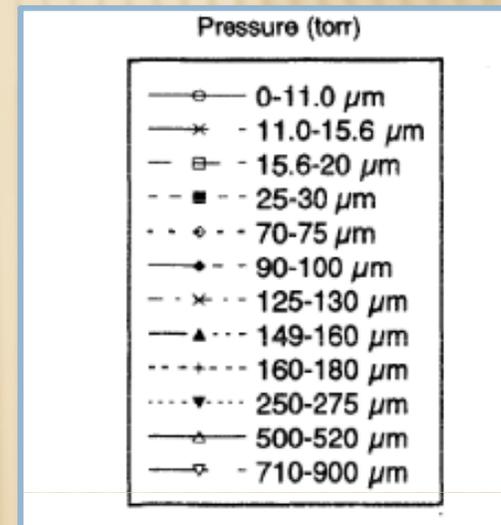
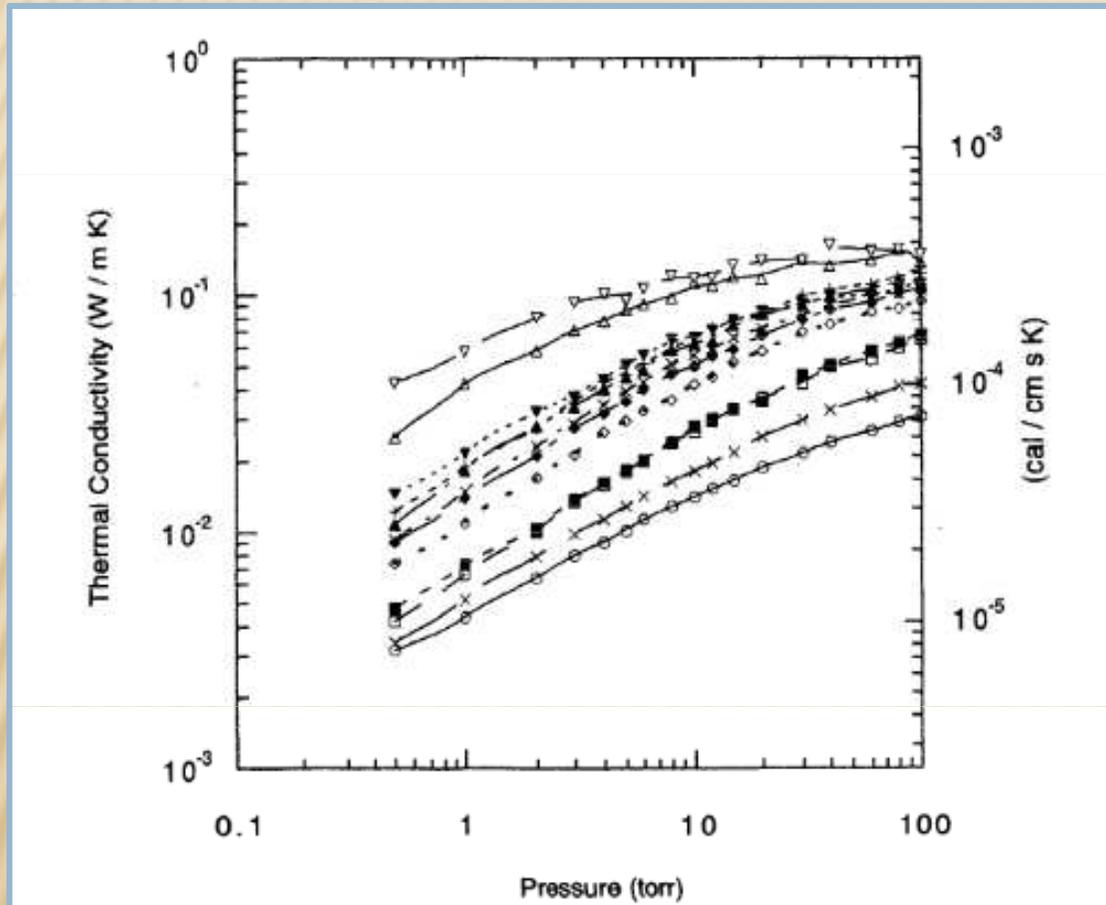


Pour chaque pression, on observe une relation linéaire entre le logarithme de la conductivité thermique et le logarithme du diamètre des particules.



$$K = A d^B$$

# RÉSULTATS DE PRESLEY



La conductivité augmente avec la taille des grains ET avec la pression

# RÉSULTATS DE PRESLEY

Plus précisément :  $K = CP^{0.6}d^{-0.11*\log(P/E)}$

- $C = 0,0015$  et  $E = 84000$
- $d$  en  $\mu\text{m}$ ,  $P$  en torr et  $K$  en  $\text{W/m K}$

A faible pression (0,5 à 10 mbar),  $B \sim 0,5$



$$K = A\sqrt{d}$$

Logique ! Car l'aire dans laquelle se fait la conduction thermique est proportionnelle au carré du diamètre des grains, lorsque la pression augmente les collisions intermoléculaires jouent un plus grand rôle dans le transfert d'énergie.

# RÉSULTATS DE PRESLEY

Et la densité ?

Size Range, $\mu\text{m}$	Density, $\text{kg/m}^3$
710–900	2000
500–520	1800
250–275	2000
160–180	1700
149–160	1700
125–130	1500
90–100	1700
70–75	1500
25–30	1400
15.6–20	1200
11–15.6	900
<11	700

Des densités de « compactages moyen » sont utilisés

# NOTRE TRAVAIL

---

L'équation de Presley décrit assez bien les mesures, mais :

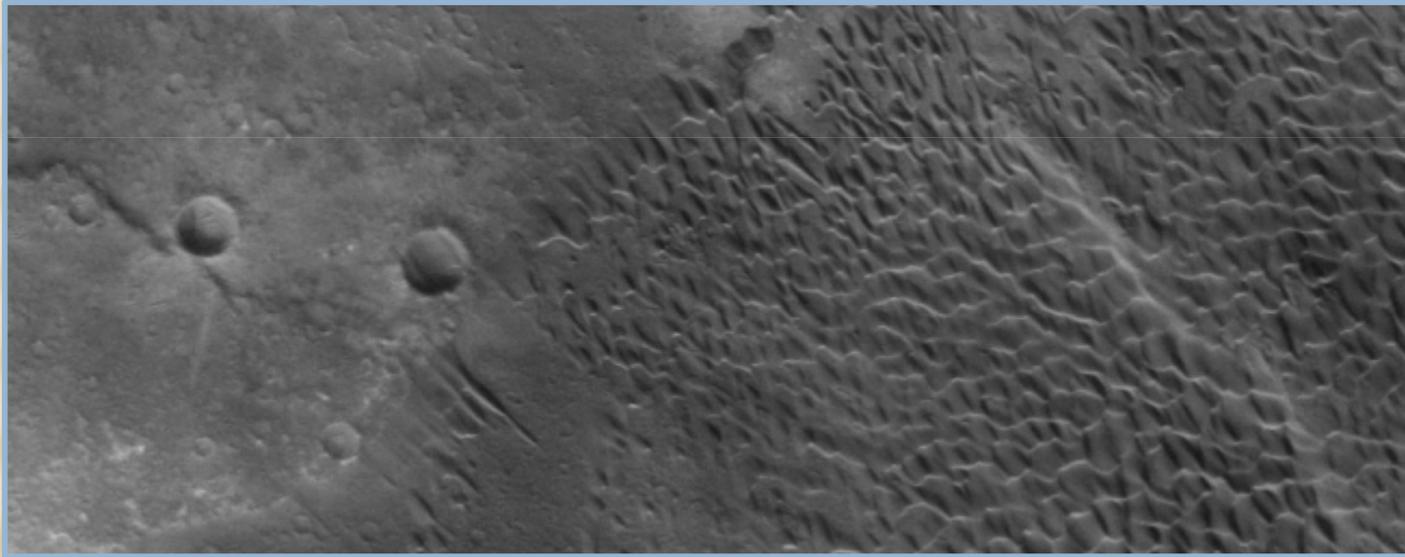
- Aucune information sur la densité !
- Petits écarts entre mesures et loi empirique (dus à la variation de la densité ?)
- Modèle non valide pour les surfaces poreuses



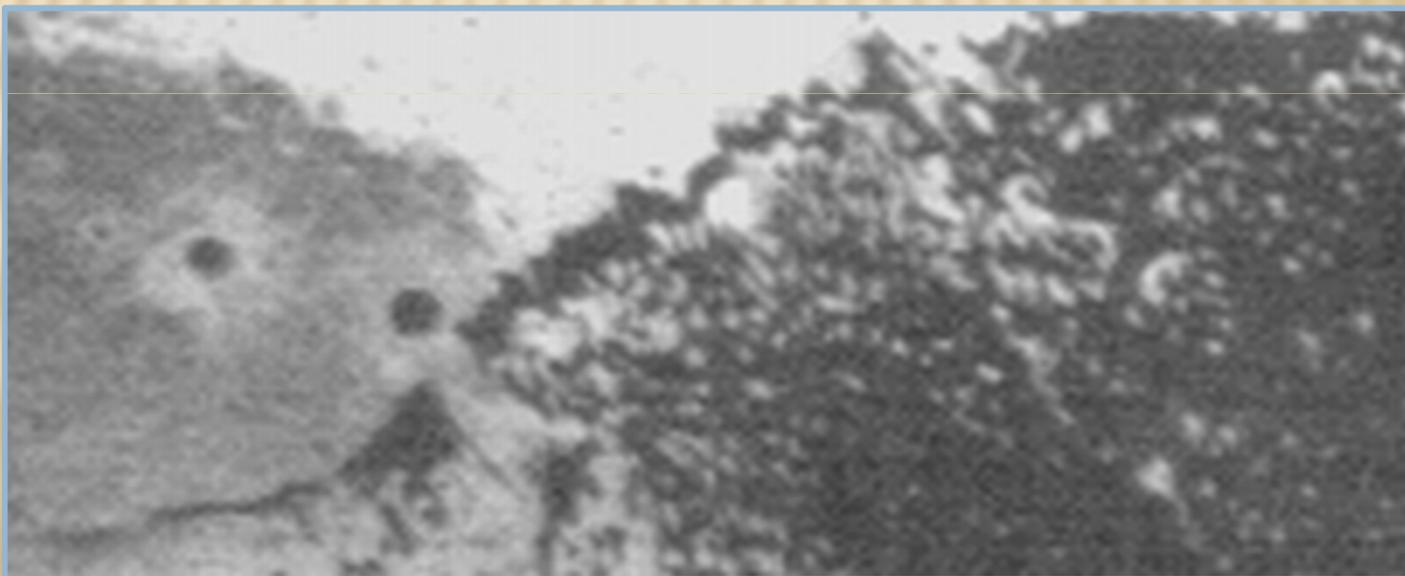
*D'où le besoin d'un modèle théorique prenant en compte la porosité*

# NOTRE TRAVAIL

Application à la surface de la planète MARS : les dunes de Mars (images THEMIS, Mars Odyssey)



Visible



IR

# LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE DES MATÉRIAUX POREUX

# LE MODÈLE EN SÉRIE

---

- Modèle unidimensionnel



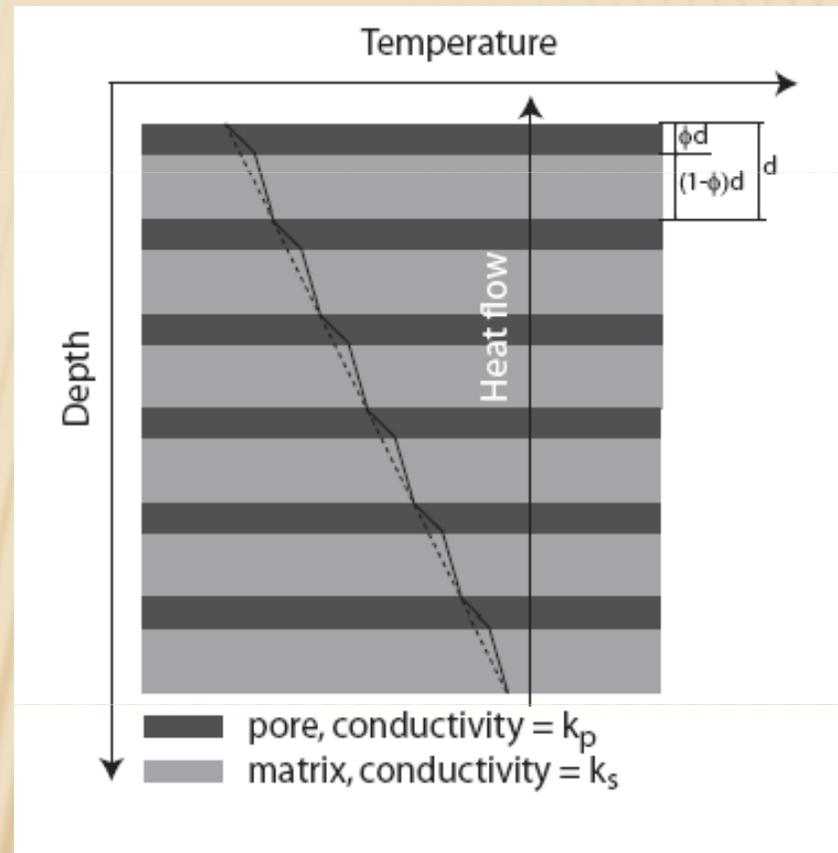
- Couches parallèles (perpendiculaires au flux de chaleur)

- Alternance entre « couches solides » et « couches poreuses »



- Relations faisant intervenir la porosité

# La représentation de la distribution de la porosité pour le modèle en série



# Résolution de l'équation du flux de chaleur



$$T(z) = T_s + ndF \left( \frac{\phi}{k_p} + \frac{1-\phi}{k_s} \right) + \frac{(z - nd)F}{k_s}$$

- $T_s$  : Température de surface
- $d$  : Epaisseur d'un couple de couches
- $F$  : Flux de chaleur
- $\phi$  : Porosité
- $k_s$  : Conductivité thermique dans la matrice solide
- $k_p$  : Conductivité thermique dans la couche poreuse

La conductivité thermique d'un matériau poreux est donnée par :


$$k = \frac{1}{\left( \frac{\phi}{k_p} + \frac{1 - \phi}{k_s} \right)}$$

# LE MODÈLE EN PARALLÈLE

---

- Modèle unidimensionnel



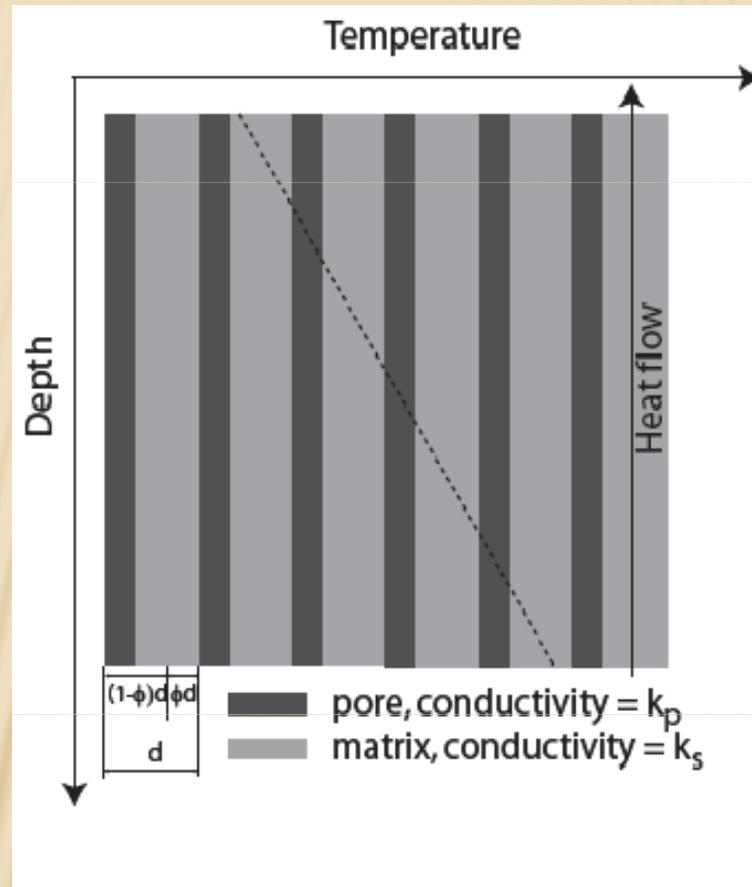
- Couches parallèles ( parallèles au flux de chaleur)

- Alternance entre « couches solides » et « couches poreuses »



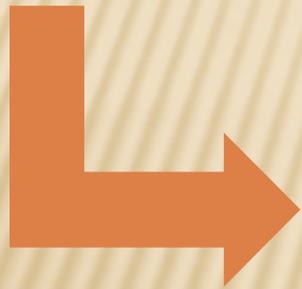
- Relations faisant intervenir la porosité

# La représentation de la distribution de la porosité pour le modèle en parallèle



## Le flux de chaleur

$$F = \phi k_p \frac{dT}{dz} + (1 - \phi) k_s \frac{dT}{dz}$$



$$k = k_p \phi + (1 - \phi) k_s$$

# LE MODÈLE EMPIRIQUE GÉOMÉTRIQUE

- Modèle empirique (aucune base physique)



Modèle formulé par Woodside et Mesner (1961)



Relation faisant intervenir la porosité

La conductivité thermique est  
donnée par :

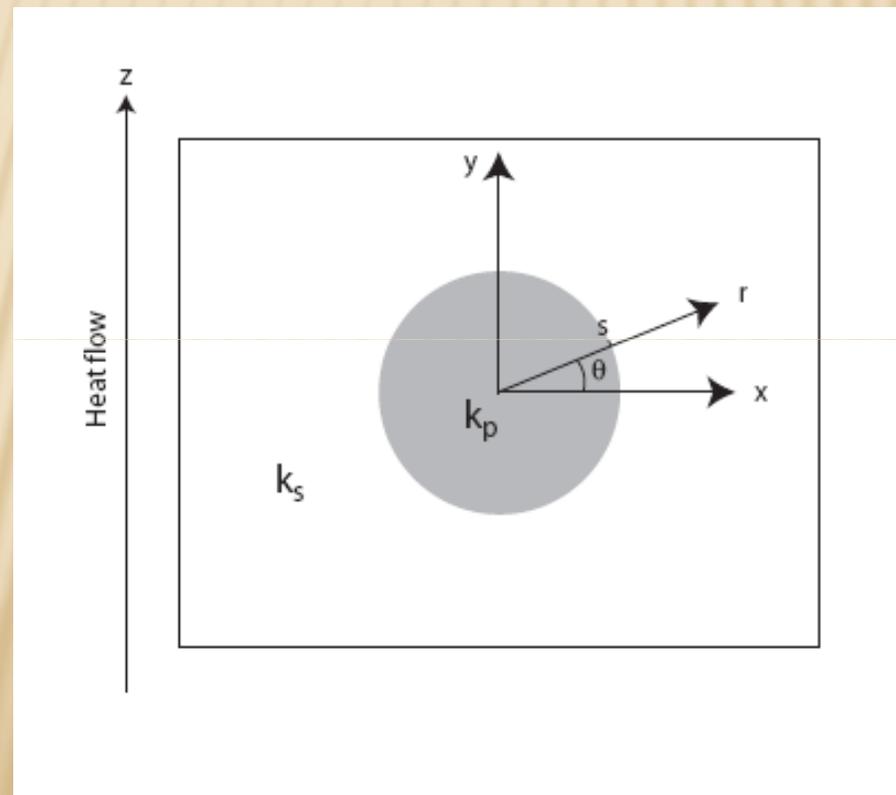


$$k = k_p^\phi k_s^{1-\phi}$$

# LE MODÈLE SPHÉRIQUE

- Modèle prenant en compte des inclusions sphériques

↳ Relation faisant intervenir la porosité



La conductivité effective du milieu pour le modèle avec des inclusions sphériques


$$k = \frac{[(3\phi - 1)k_p + (2 - 3\phi)k_s] + \sqrt{[(3\phi - 1)k_p + (2 - 3\phi)k_s]^2 + 8k_p k_s}}{4}$$

# LA CONDUCTIVITÉ DES PORES

---

- Le modèle de Loeb

La conductivité des pores provient :



Termes additifs de la conduction du gaz



Radiations thermiques

## La conductivité des pores



$$k_p = k_g + 4\gamma d \varepsilon \sigma T^3$$

- $k_g$  : conductivité du gaz
- $d$  : diamètre de la particule
- $\gamma$  : facteur géométrique
- $\varepsilon$  : émissivité
- $\sigma$  : constante de stefan boltzmann
- $T$  : température

# UNE NOUVELLE FORMULATION

Le modèle en série

$$k = \frac{1}{\frac{\phi}{k_g + 4\gamma d \varepsilon \sigma T^3} + \frac{1 - \phi}{k_s}}$$

Le modèle en parallèle

$$k = (k_g + 4\gamma d \varepsilon \sigma T^3)\phi + (1 - \phi)k_s$$

Le modèle empirique géométrique

$$k = (k_g + 4\gamma d \varepsilon \sigma T^3)^\phi k_s^{1-\phi}$$

Le modèle sphérique

$$k = \frac{[(3\phi - 1)(k_g + 4\gamma d \varepsilon \sigma T^3) + (2 - 3\phi)k_s] + \sqrt{[(3\phi - 1)(k_g + 4\gamma d \varepsilon \sigma T^3) + (2 - 3\phi)k_s]^2 + 8(k_g + 4\gamma d \varepsilon \sigma T^3)k_s}}{4}$$

# ETUDE DES MODÈLES

---

# Utilisation de la méthode des moindres carrés

- $$v = A \hat{\alpha} - l$$

↳ linéaires (parallèle)

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T l$$

↳ non - linéaires (série, géométrique, sphérique)

$$\begin{pmatrix} d \hat{\alpha} \\ d \hat{\beta} \end{pmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T l$$

- $$k_p = k_g + 4\gamma\epsilon\sigma T^3 d = \alpha + \beta d$$

- On se place à une pression moyenne de 5,3mBar.



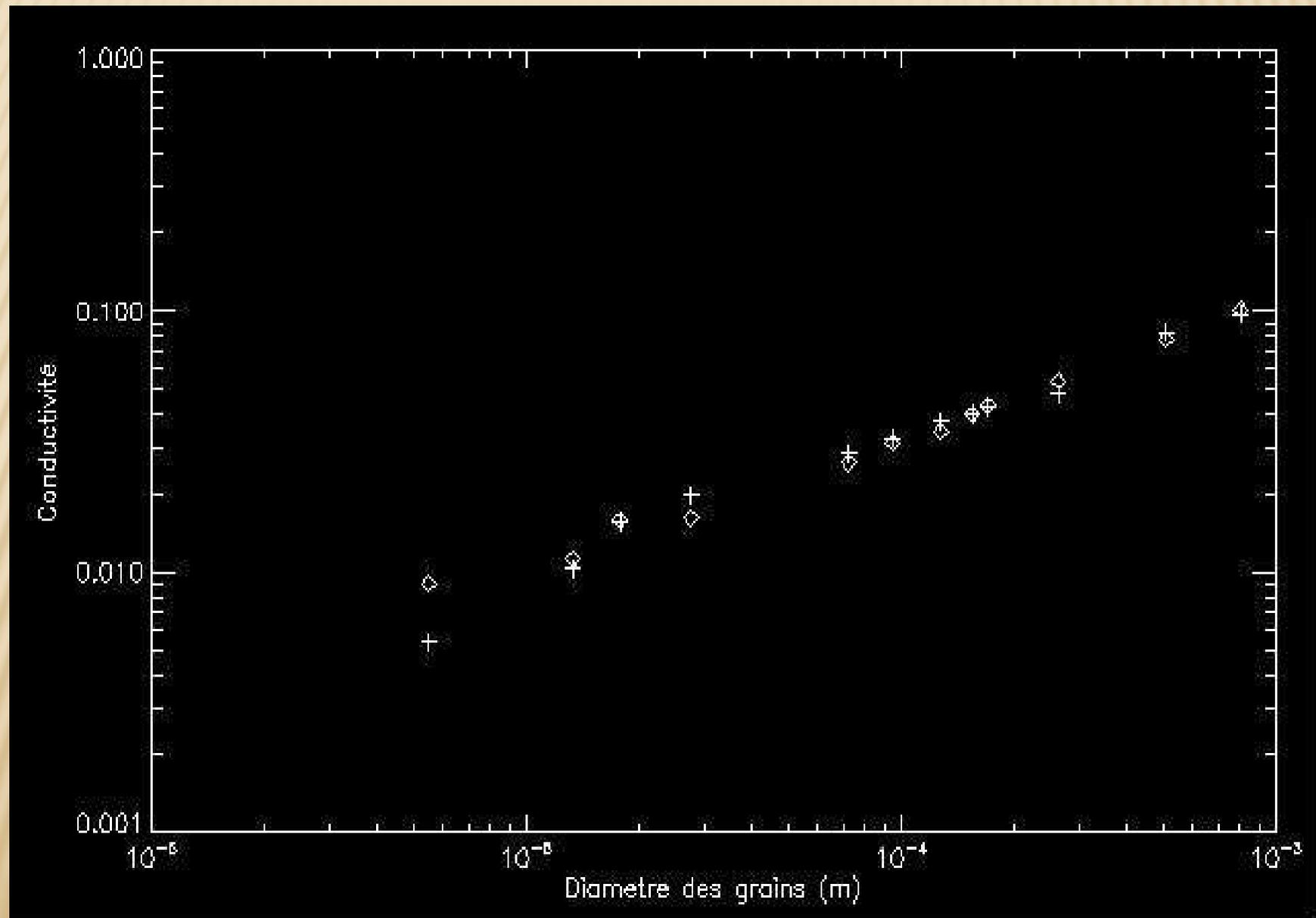
Sur Mars : de 1,5 à 9mBar

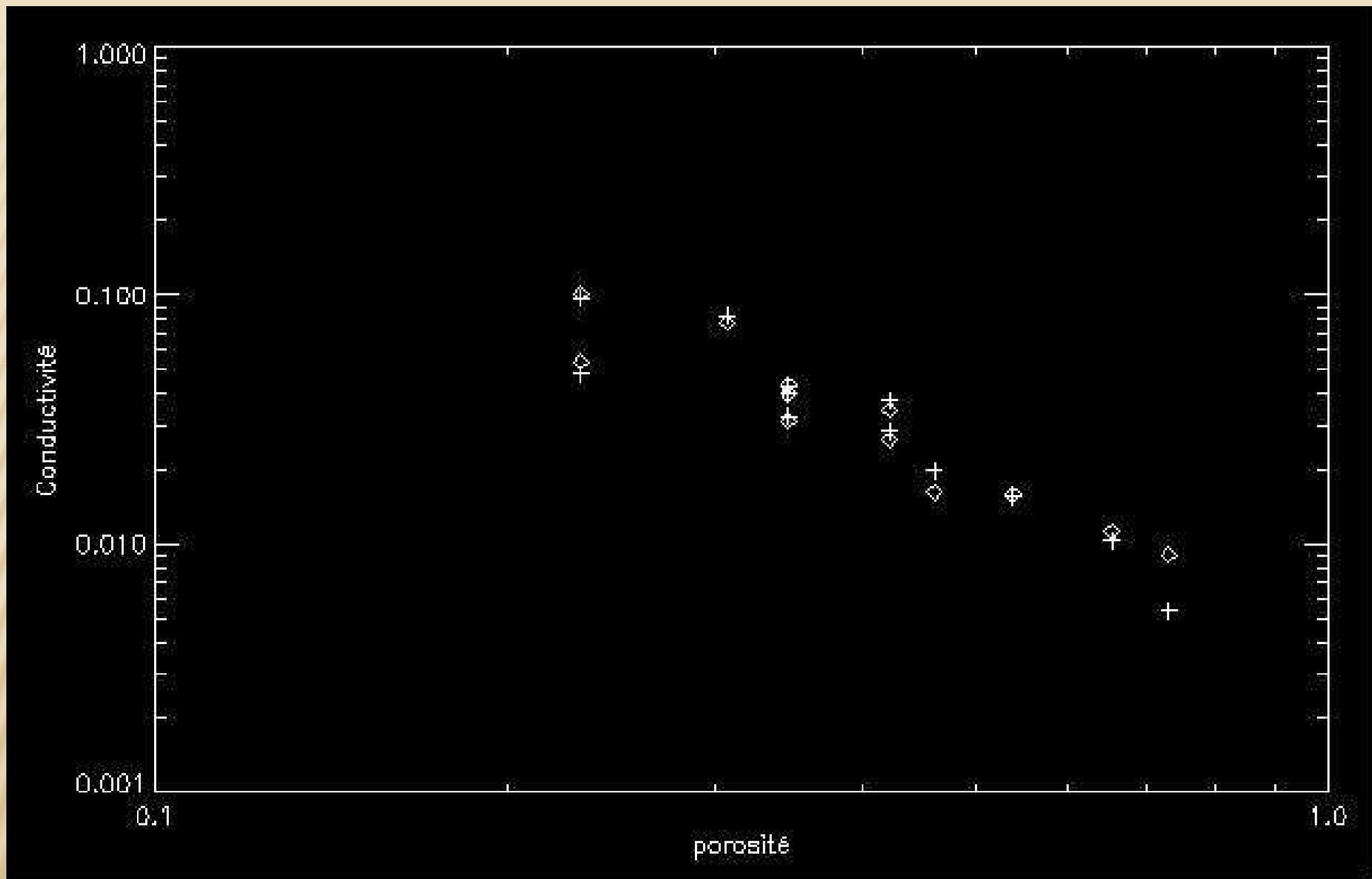
- Sur les graphes:

◆ Conductivités données

✖ Conductivités du modèle étudié

# LE MODÈLE PARALLÈLE





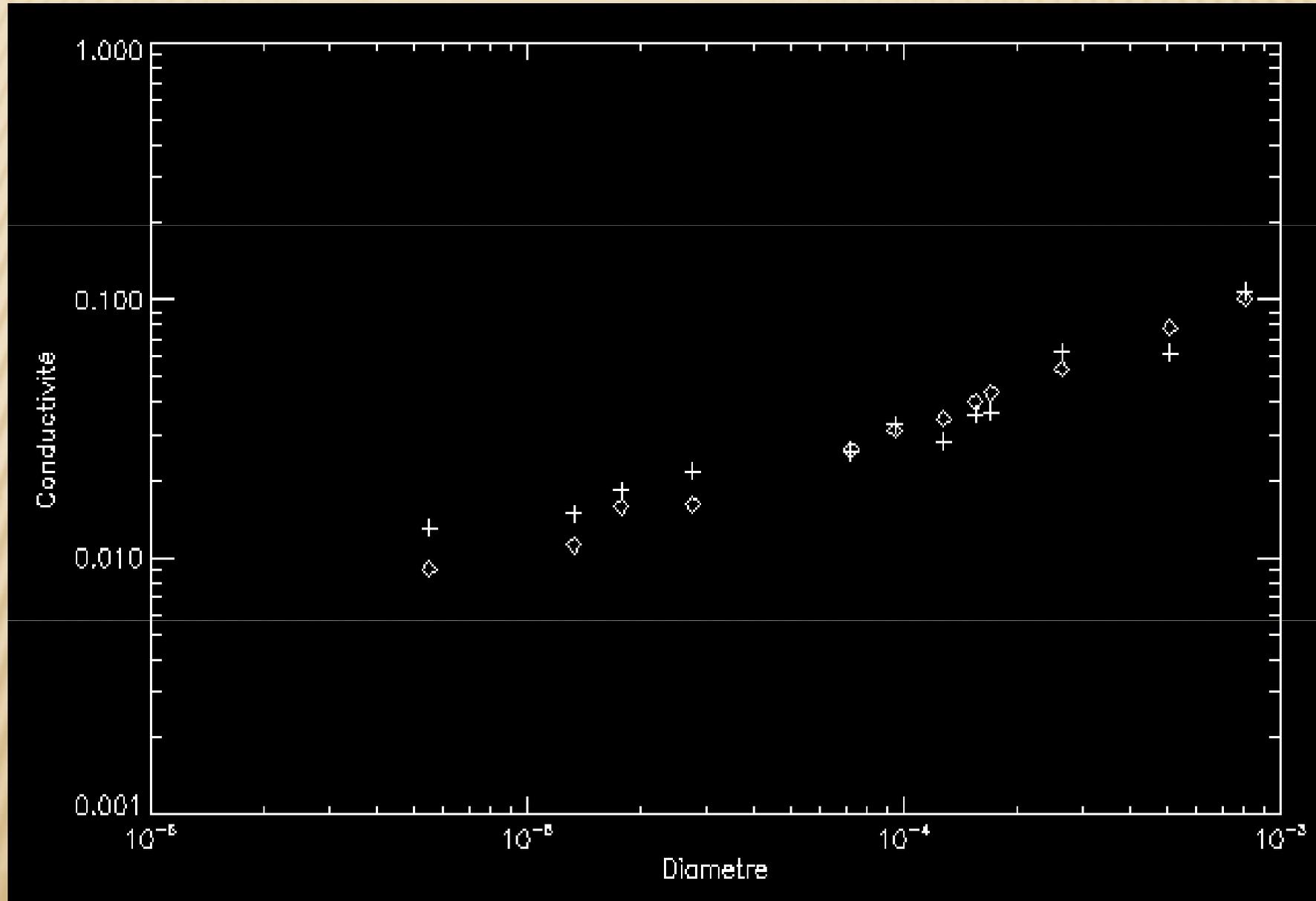
PROBLEME

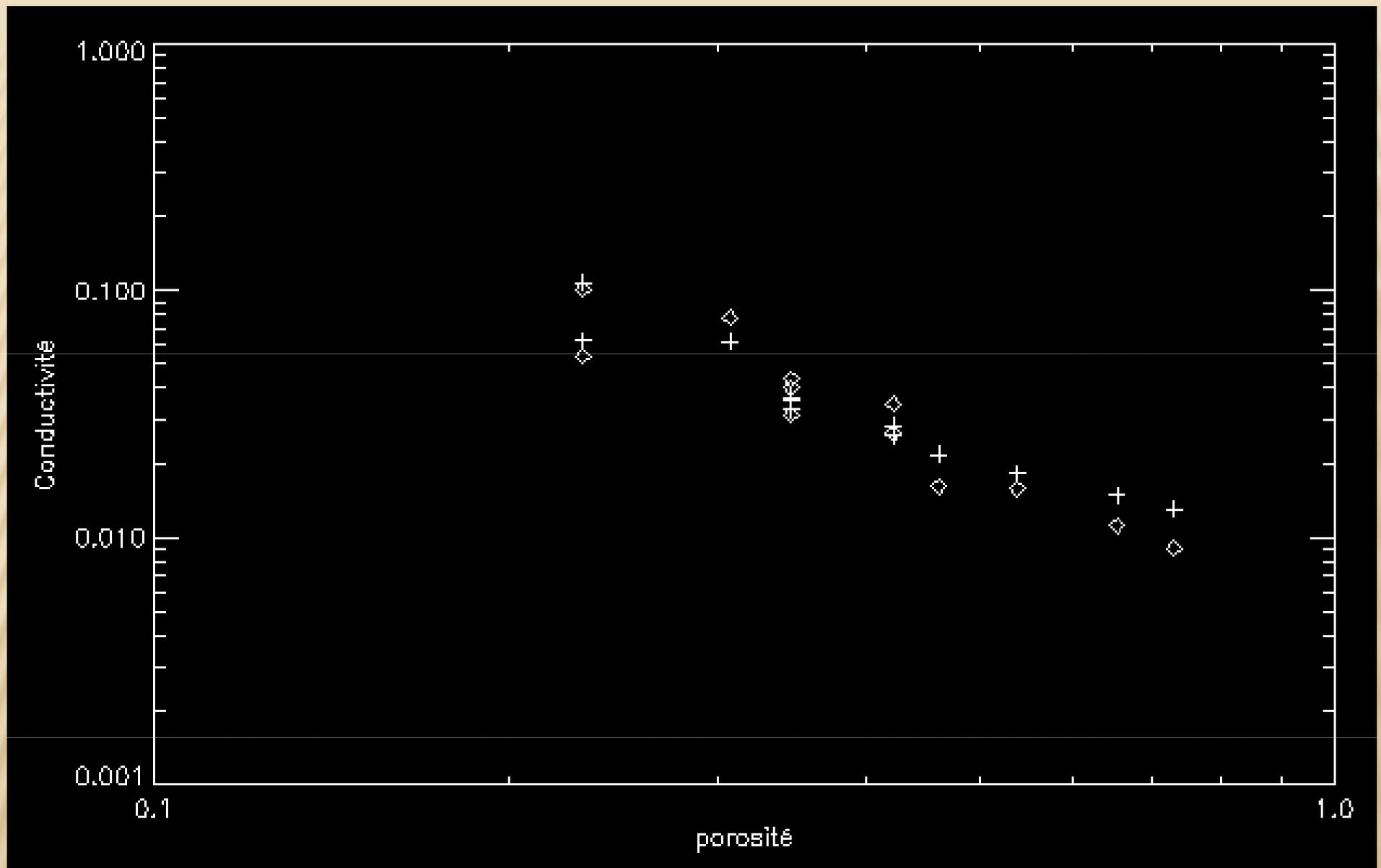


$$k_g < 0$$

Physiquement impossible

# LE MODÈLE EN SÉRIE





PROBLEME

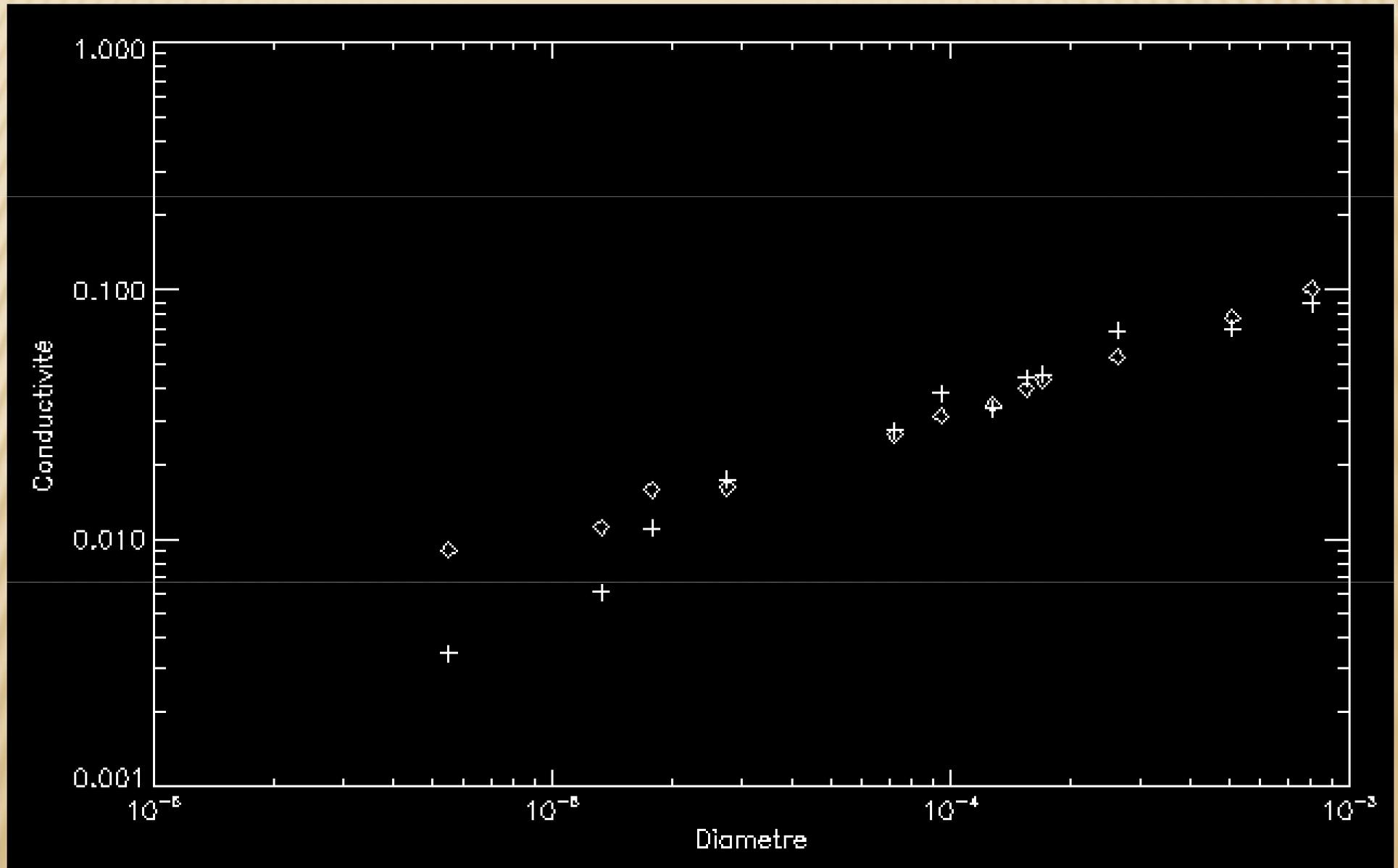


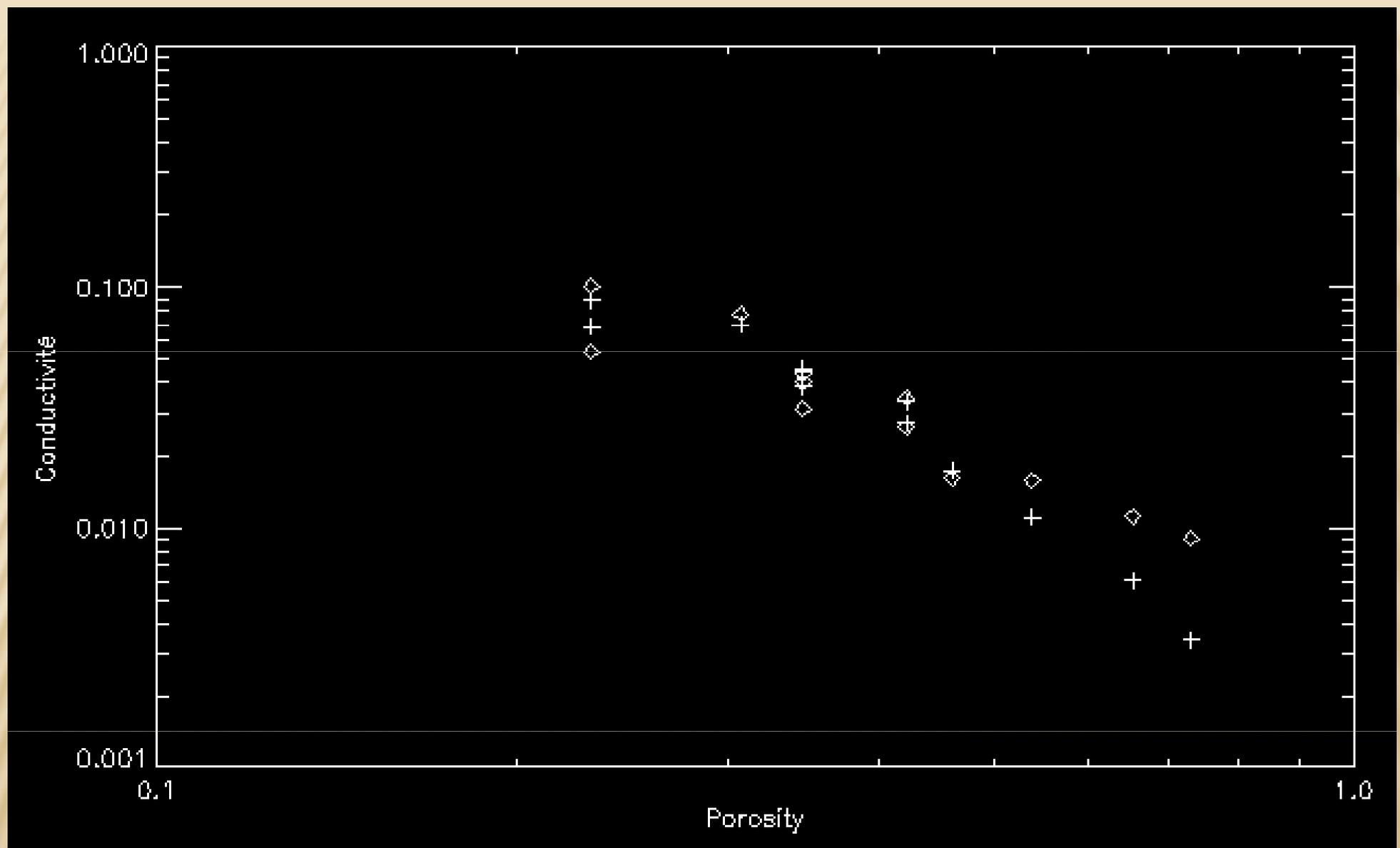
$$k_s = 3000 \text{ W/m K}$$

Sur Mars:

$$k_{s, SiO_2} = 1,4 \text{ W/m K}$$

# LE MODELE EMPIRIQUE GEOMETRIQUE



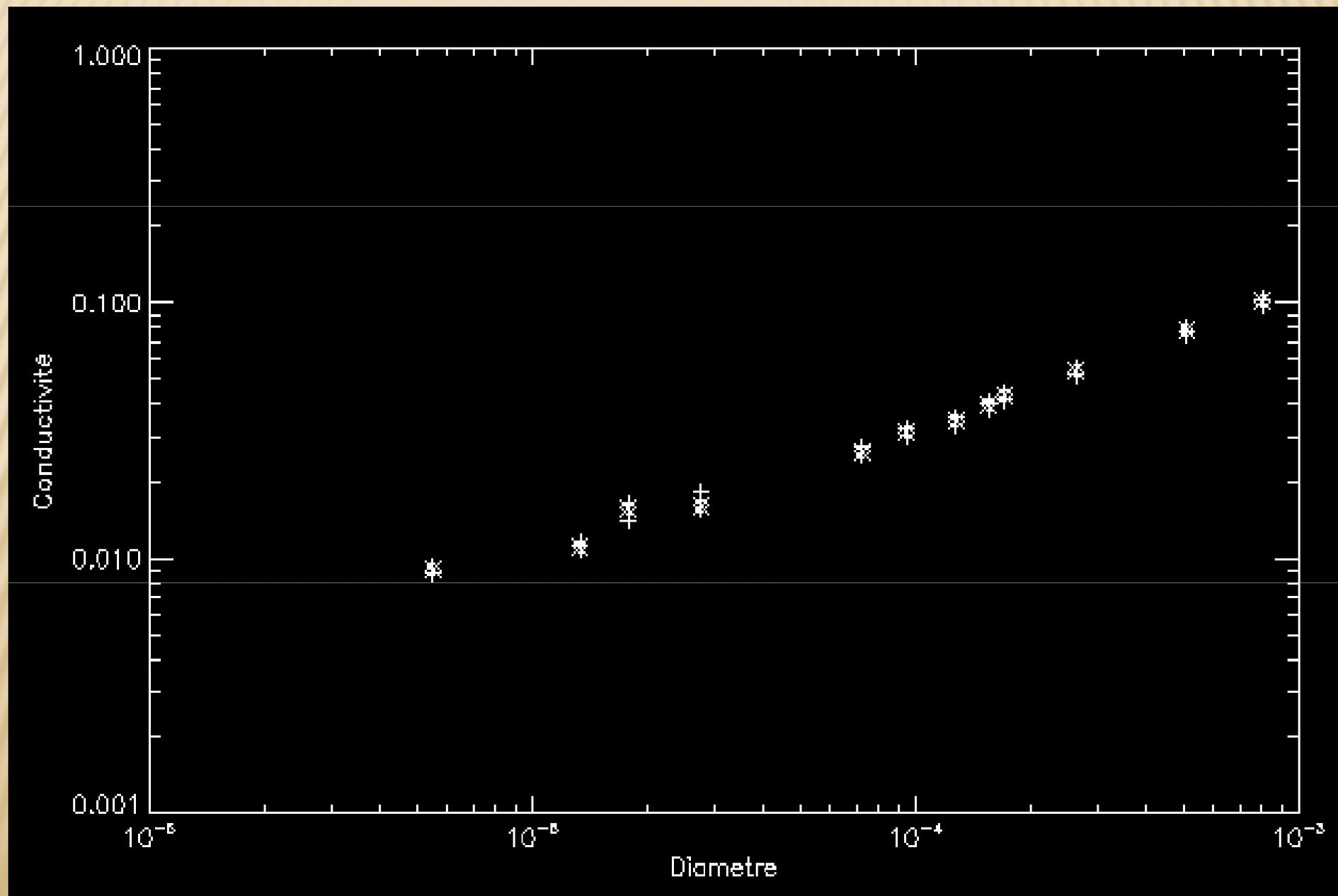


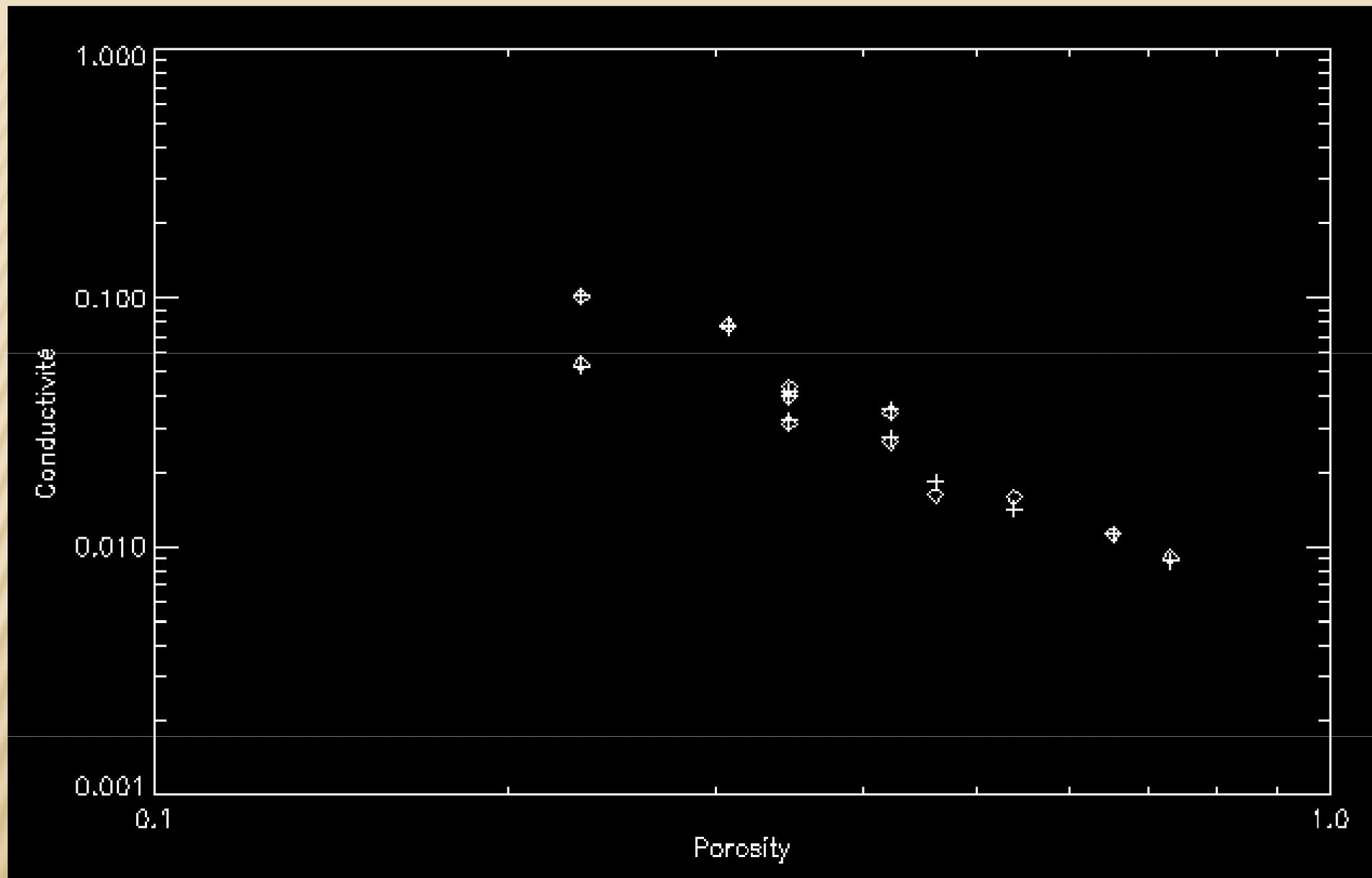
PROBLEME



Assez bonne approximation  
mais moins précis que le  
modèle de Presley

# LE MODELE SPHERIQUE





$$k_s = 0,61 \text{ W/m K}$$

$$k_g = 0,19 \text{ W/m K}$$

erreur au modèle = 0,1%



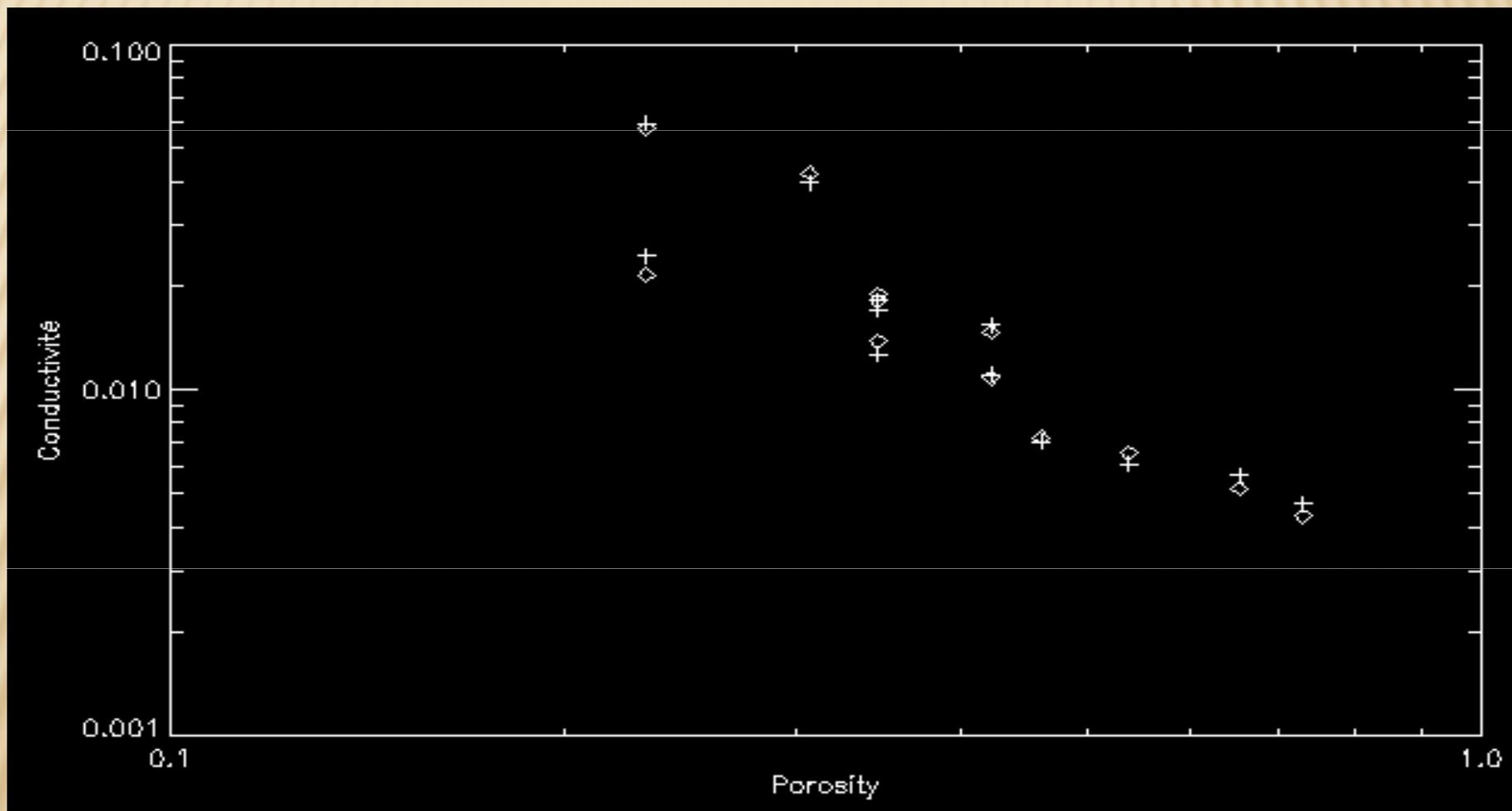
Explique les points qui ont mêmes densités mais un diamètre différent

**CONCLUSION**

---

- Meilleur modèle >> modèle sphérique

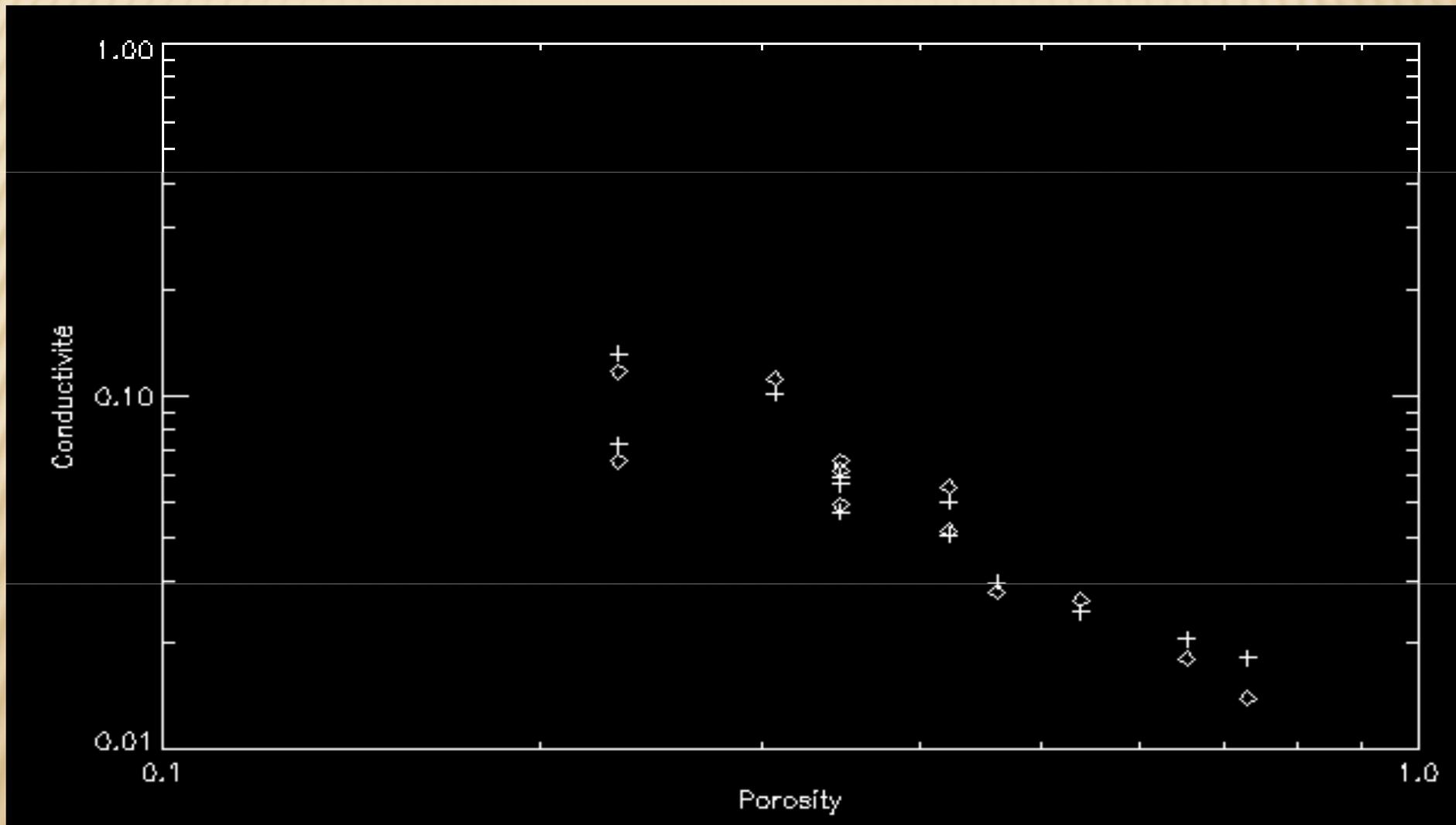
↳ Sur Mars : Pression de 1,33mBar....



Erreur au modèle = 0,09%



....à 13mBar



Erreur au modèle = 0,7%

- Modèle proche de la réalité >> grains de sable assimilés à des sphères

$$k_s = 0,61 \text{ W/mK}$$

$$k_g = 0,19 \text{ W/mK}$$



$$k_{s, SiO_2} = 1,38 \text{ W/m K}$$

$$k_{g, CO_2} = 0,070 \text{ W/m K}$$

Écart probable >> on néglige la conductivité de contact entre les grains

- Comparaison avec Presley



$$\sigma_{0, sphère} = 0,1\%$$

$$\sigma_{0, Presley} = 7,5\%$$

# PERSPECTIVES

---

- × Refaire les expériences en faisant varier la température
- × Application du modèle sphérique à la planète Mars en couplant observation thermique et observation RADAR
- × Confirmer les résultats grâce à des mesures au sol

# PERSPECTIVES

---

- ✘ Tester le modèle en remplaçant les grains par du vide
- ✘ Applications aux surfaces poreuses



L'astéroïde Itokawa, image JAXA