

Remerciements

Je souhaite adresser en premier lieu mes plus vifs remerciements à Bernard Schmitt
p

6.1 Adsorption d'eau sur des analogues du sol martien : thermodynamique et spectroscopie .

Introduction

L'état actuel et l'évolution passée de l'hydrosphère martienne sont au centre des problématiques scientifiques concernant la planète rouge. Ces questions

Introduction

réflexion » est ainsi traité au traraité

Chapitre 1

1. Eau et minéraux hydratés, acteurs et témoins de l'histoire géologique martienne

carbone que pour l'eau. Néanmoins les cycles des deux molécules sont très dissemblables. Le CO_2 est en effet et

volcanisme rencontré évolue largement au cours du temps. Enfin, les témoins géomorphologiques et minéra

1.2 Les états physiques de l' dans le passé martien

1.2.1 Indices géomorphologiques

A la fin du *XIX*

La transition du Noachien à



Fig. 1.1: Exemples de structures géologiques associées à l'action

1.2.2 Indices géochimiques et minéralogiques.

Ce paragraphe résume certaines découvertes faites dans les champs de la géochimie et de la minéralogie. Cependant,

phylosilicates. Ces minéraux sont suspectés depuis plusieurs décennies, par analogie avec

Relations en

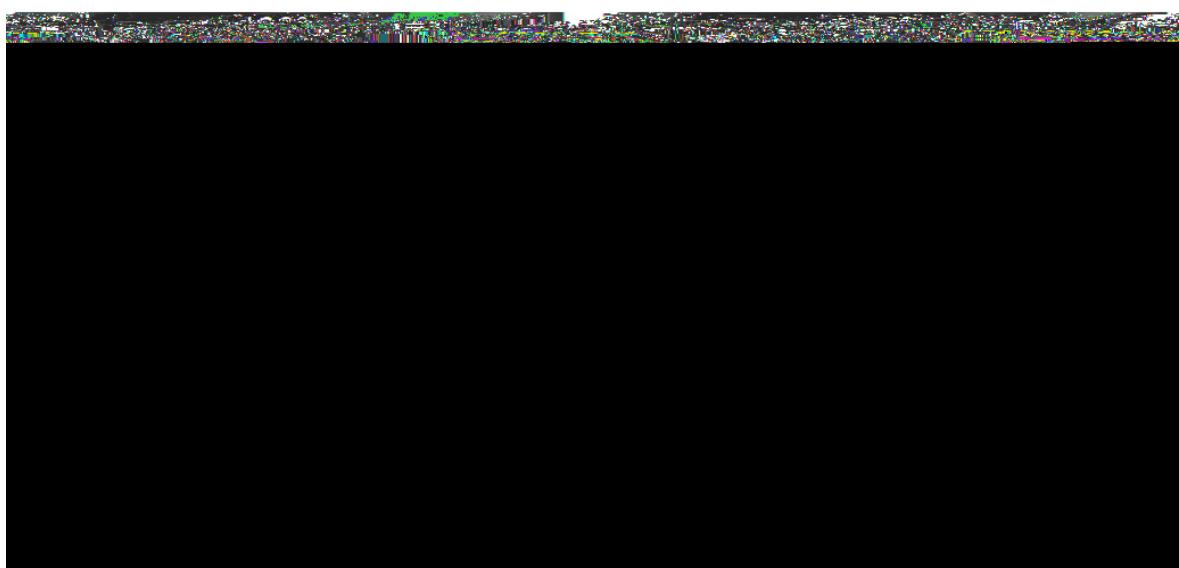


Fig. 1.4: Cartographie des dépôts de composés volatils au

1. Eau et minéraux hydratés, acteurs et témoins de l'histoire géologique martienne

Relations entre eau et minéraux dans le

eau et minéraux

Relations entre

dans le cadre

1. Eau et minéraux hydratés, acteurs et témoins de l'histoire géologique martienne

Une démarche inverse a également été entreprise pour estimer en laboratoire la di usivité d'analogues terrestres du régolithe martien à la vapeur d'eau (Chevrier *et*

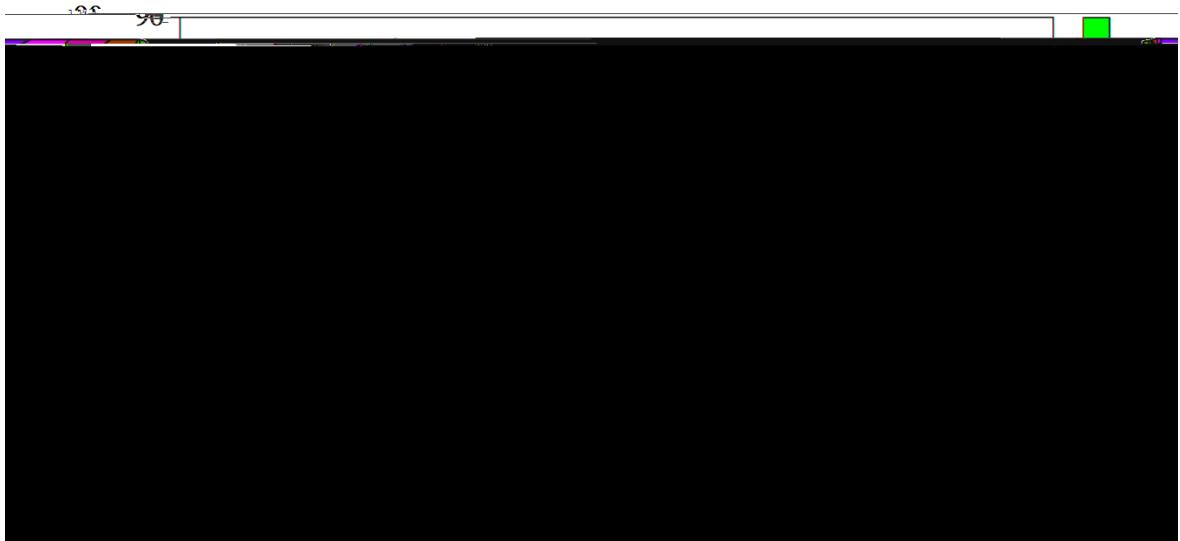


Fig.

Chapitre 2

2. Interactions

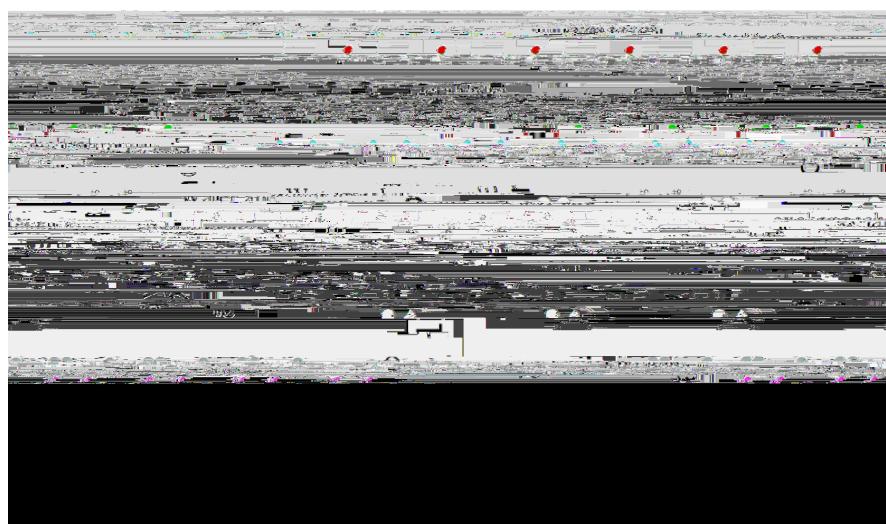


Fig. 2.1: Représentation schématique d'une smectite de type Montmorillonite avec des ions so-

2. Interactions eau

Hydratation minérale : définition des termes et des processus.

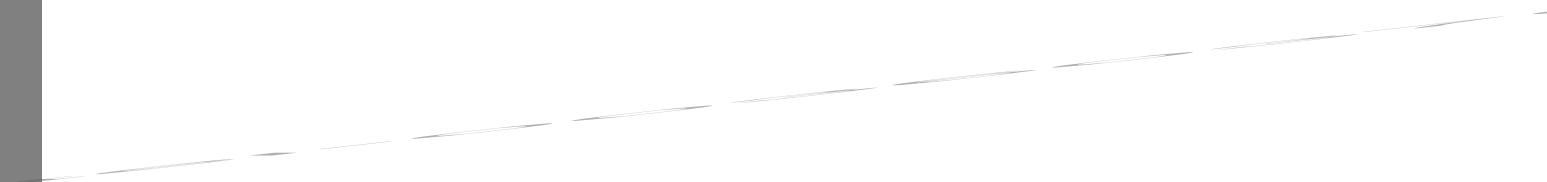
Détermination du type d'hydratation par

2. Interactions eau - minéraux : aspects thermodynamiques et spectroscopiques

des solides telles que la surface spécifique ou la porosité. L'une des mesures les plus courantes dans ce domaine est celle des isothermes

2. Interactions eau

Hydratation minérale :



2. Interactions eau - minéraux : aspects thermodynamiques et spectroscopiques

et permet avant tout une comparaison aisée avec
a

2. Interactions eau - minéraux : aspects thermodynamiques

2. Interactions eau - minéraux : aspects thermodynamiques et spectroscopiques

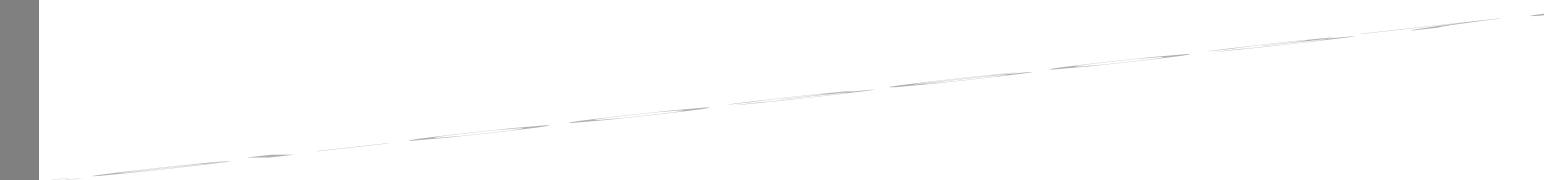
2.2 Principe



2. Interactions e0

Principe de la spectroscopie infrarouge et application à l'hydratation

2. Interactions ea



Chapitre 3

Spectroscopie proro

Etude des surfaces planétaires par spectroscopie



ouge. Spectroscopie proche infrar

3.1.3 Le je

3. Spectroscopie proche infrarouge en réflexion

automatique systématique des composés volatils (Schmidt, 2007), la correction des

Etude des surfaces

3. Spectroscopie proche infrarouge en réflexion

qu'alors pour

Analyse des spectres pro

3. Spectroscopie proche infrarouge en réflexion

est coûteuse en temps de calcul et délicate à inverser. La seconde solution consiste en une approche semi empirique où l'ETR est « adaptée » au cas des surfaces particulières denses. Décrivons rapidement quelques modèles basés sur l'une ou l'autre de ces approches.

Modèle de Hapke (Hapke, 1981, 1993, 2002) Ce modèle est de très loin le plus utile

Analyse des spectres proche-IR

Analyse sp

3. Spectroscopie proche infrarouge en réflexion

et un InSb pour la gamme : $1,0 - 4,8 \mu\text{m}$. Une détection dite « synchrone » permet d'isoler le signal réfléchi des signaux parasites comme la lumière

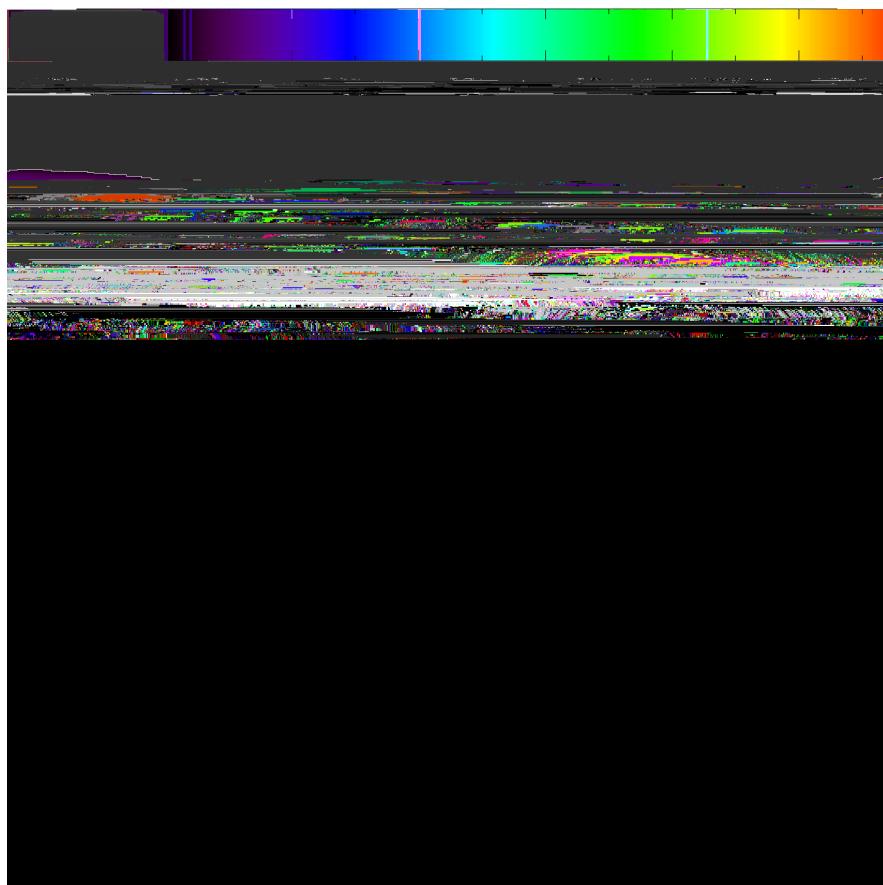


Fig. 3.4: Cartographie de l'inhomogénéité d'éclairage sur le plan de l'échantillon. Dans cet exemple, l'incidence est verticale et l'angle d'émergence : $e=70^\circ$. L'ellipse noire représente la zone "vue" par le détecteur. On représente par l'échelle de couleurs de flux reçu en pourcentage de la valeur maximale mesurée.

Sur cette figure, on visualise également l'ellipse d'observation correspondant à un

Analyse des spectres proche-IR en

3. Spectroscopie proche infrarouge en réflexion

ou

Chapitre 4

Intensité

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydratés :
texture

E et de la taille

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydratés : texture et géométrie de mesure

utilisent cette carte pour étudier le rôle de l'eau au cours de l'histoire géologique de la planète. Grâce à des observations télescopiques réalisées avec l'instrument NICMOS du télescope spatial Hubble, Noe Dobrea *et al.* (2003) ont également

E et de la taille des particules et corrélation avec l'albédo

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydratés :

E et de la taille

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydratés : texture et géométrie de mesure

albedo et critères de force de bande, les cartes réalisées avec différents critères spectraux sont souvent

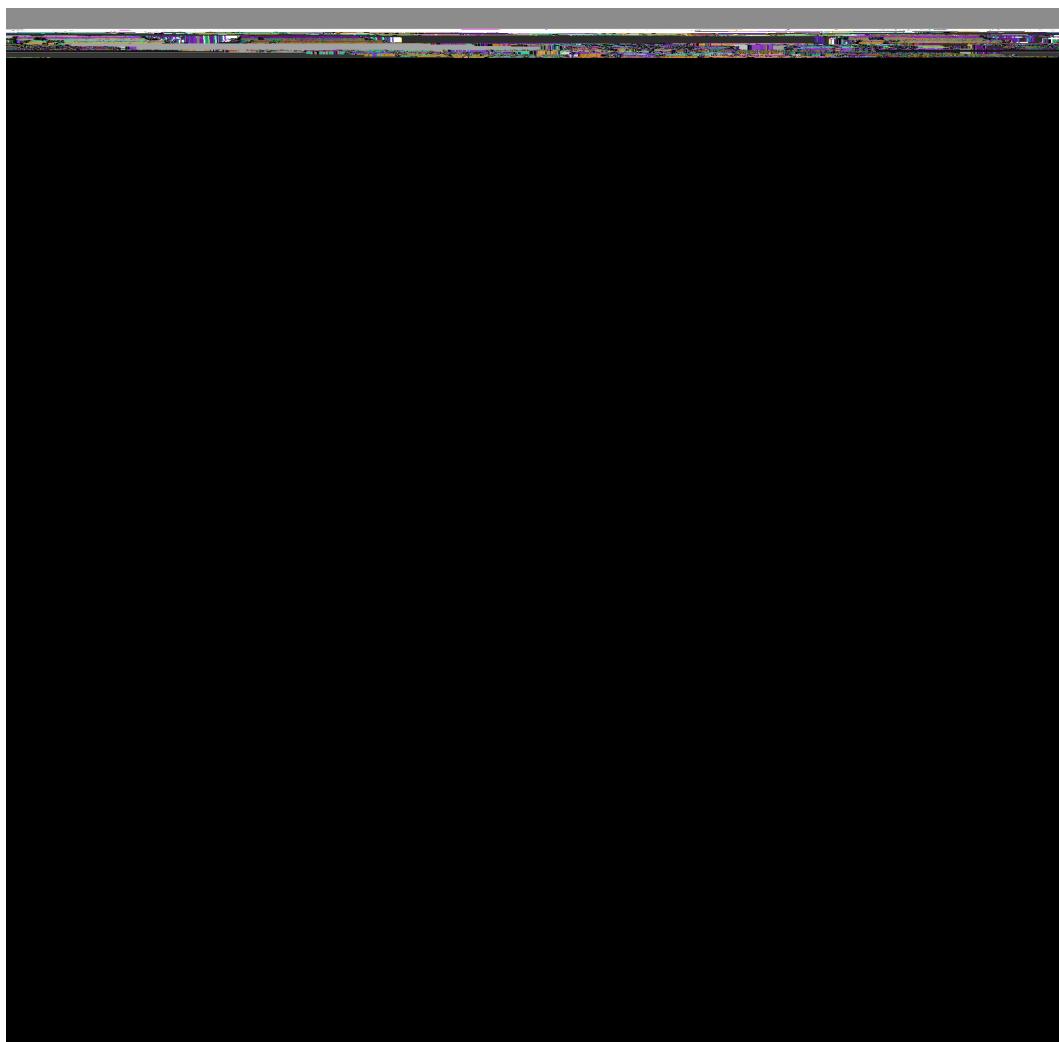


Fig. 4.1: Photographies des six diérentes

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydratés : texture et géométrie de mesure

d'altération (phyllosilicates, amphiboles, serpentine). Le tu olcanique été broy à la main dans un mortier puis neuf fractions de tailles de grains ont été séparées : moins de 25 μ 25-50 μ m, 50-100 μ m, 100-200 μ m, 200-280 m, μ 400-560 μ m, 560-800 μ m 800-1120 μ m. La 4.2 présen

E et de la t

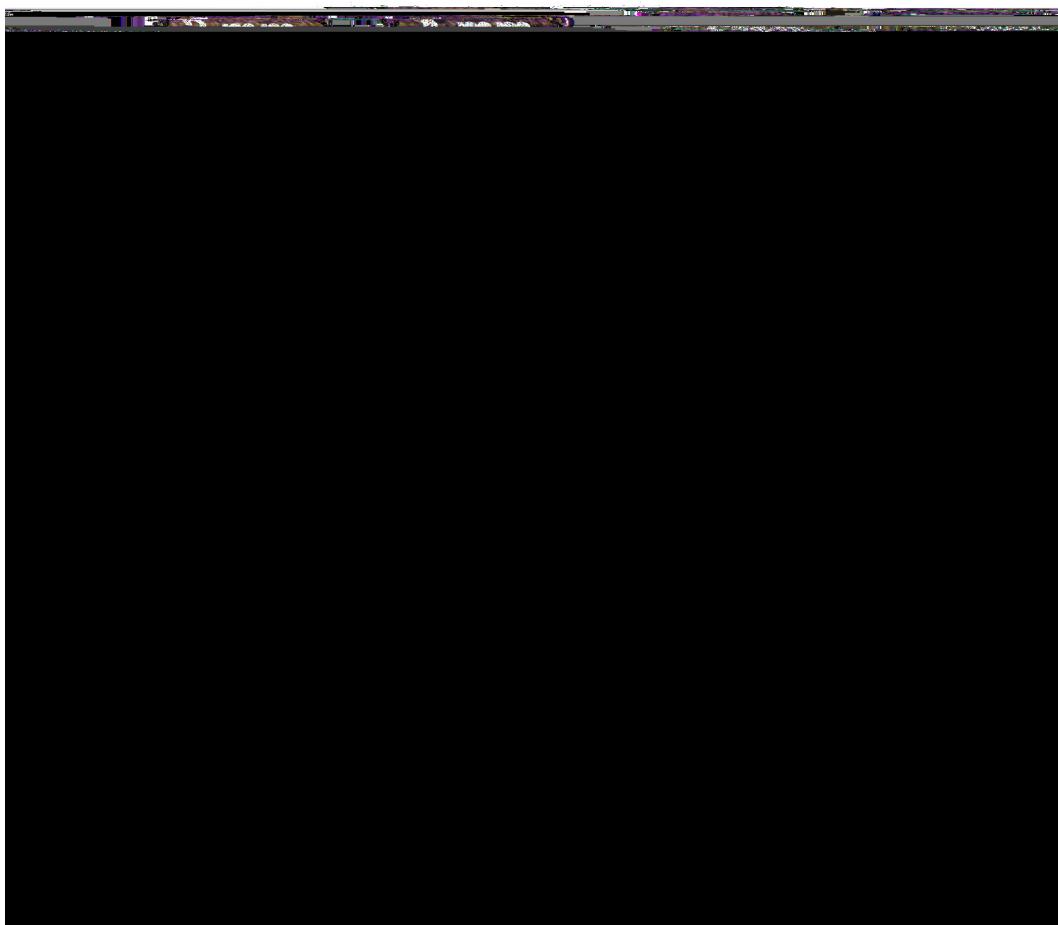
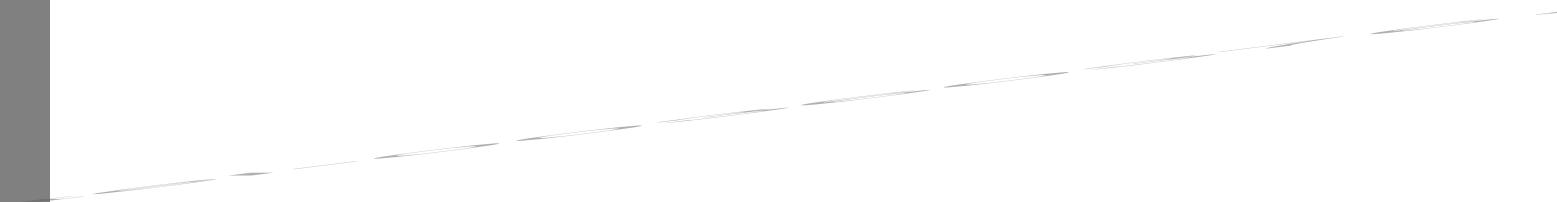


Fig. 4.3: Photographies des mélanges entre smectite STx-1 et anthracite prises au microscope binoculaire à divers grossissements. Les diamètres moyens des grains d'anthracite sont indiqués à droite des images. Tous



4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux

E et de la t

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux

E et de la taille des particules et corrélation a

4. Intensité des bandes d'absorption

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydratés :
textureETBT10.90910010.9091438.21xtureETBT048641

une fine poussière qui est prédominant sur les fractions les plus fines. Cependant, la variation de la taille des grains conserve un e et perceptible.

L'aire intégrée et normalisée (NIBA) calculée à partir des spectres en réflectance (figure 4.7 b) présente une évolution globalement similaire à cejETBT10.9010.90910010.9091341.1193677.3Tm(de)TjET

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydratés :
texture

E et de la taille des particules et corrélation

E et de la t

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydratés :
texture et géométrie de mesure

entre force de bande et proportion d'anthracite sont observées. Cependant, il faut se souvenir que de nombreux matériaux sont utilisés pour les mesures et les modélisations. D'autre part, les fonctions de phase des matériaux sont supposées isotropes dans le modèle alors qu'elles ne le sont certainement pas en réalité. Il n'est donc pas surprenant de trouver quelques incohérences qui ne contredisent pas le bon accord observé pour les comportements généraux.

Nous avons testé d'autres critères spectraux dans l'espoir de trouver une meilleure corrélation entre teneur en eau et force de la bande d'hydratation. Cependant, les effets importants de la taille des grains du matériau sombre sont évidents pour tous les critères testés, qu'ils soient calculés à partir de spectres en

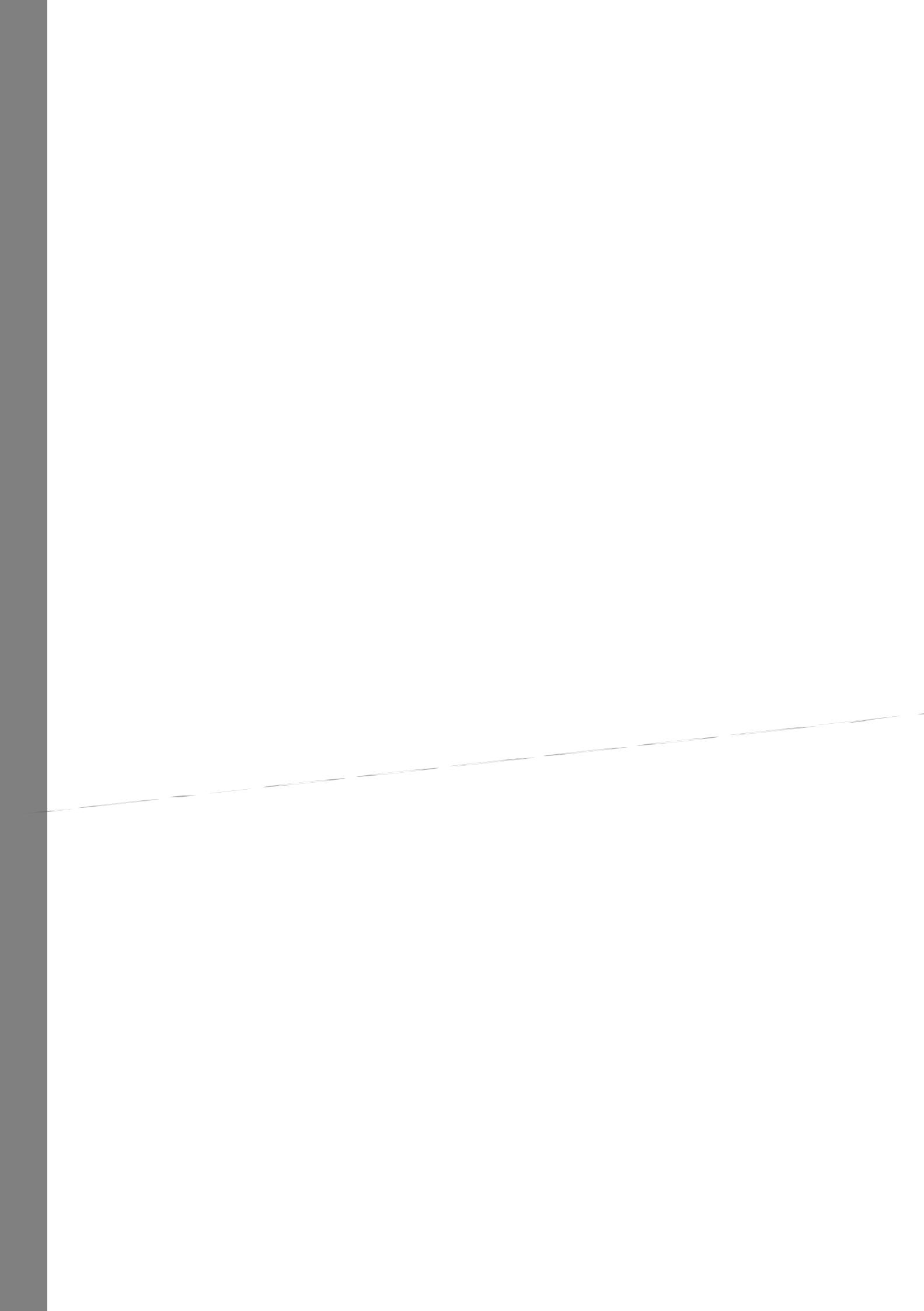
4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydratés :
texture et géométrie de mesure

E et de la taille des particules

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydratés :
texture et géométrie de mesure

NIBA est incapable de corriger cet e et (figure 4.13 e,f). La raison en est que le spectre de l'anthracite pure montre une valeur de réflectance faible (0,07) mais non nulle (figure 4.9, 4.13 c). Par conséquent, une simple

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydratés :
texture et géométrie de mesure



E et de la taille des

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydratés :
texture et géométrie de mesure

substitution d'éléments chimiques dans la structure des minéraux. Nous utilisons le modèle de transfert radiatif pour calculer les spectres en réflectance correspondant à ces deux types de mélange de la façon suivante :

Mélanges « géographiques » : Les spectres en réflectance de la smectite et du matériau sombre à l'état pur sont calculés

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydratés : texture et géométrie de mesure

taille de particules. La conversion des spectres en

E et de la taille des particules et corrélation avec l'albédo

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydratés : texture et géométrie de mesure

de réflectance dans le continuum (figure 4.13 c,d). Une simple normalisation à ce niveau de réflectance du continuum ne permettant pas de corriger la corrélation, nous proposons de ne considérer que les écarts à cette corrélation comme indicateurs de variation de l'état d'hydratation des matériaux. Cep

bandes non saturées mais très intenses, la forte non linéarité de la conversion en albédo de diffusion simple engendre des incertitudes importantes. Au contraire, la corrélation linéaire entre IBA et contin

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydratés :
texture et géométrie de mesure

simples pour les particules les plus fines. Nous montrons également que

4. Intensité

4.2 E ets de la géométrie de mesure

Cette section

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydratés : texture et géométrie de mesure

Les spectres en réflexion des surfaces de certains objets du Système Solaire ont été mesurés sous divers angles d'incidence et d'émergence grâce aux télescopes terrestres et aux instruments em-

paraisons de la ~~fonction~~ ~~fonction~~ bandes entre di érents objets et classes d'obd'ob

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydratés :
texture et géométrie de mesure

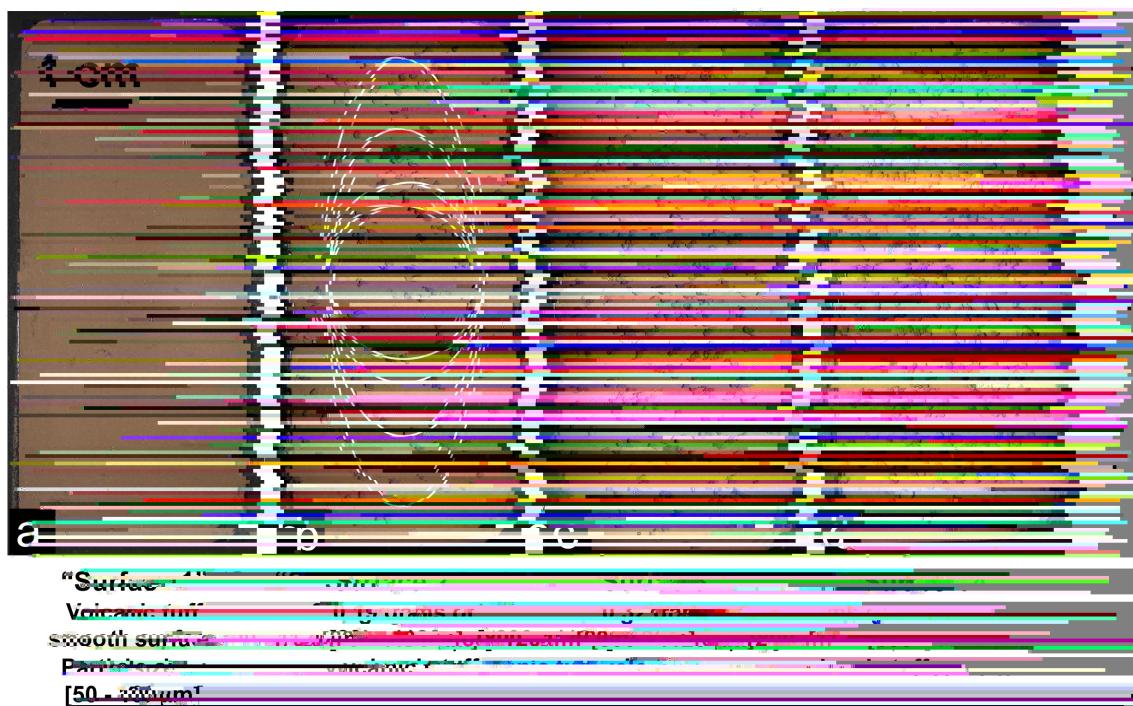
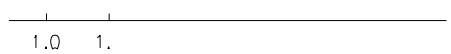


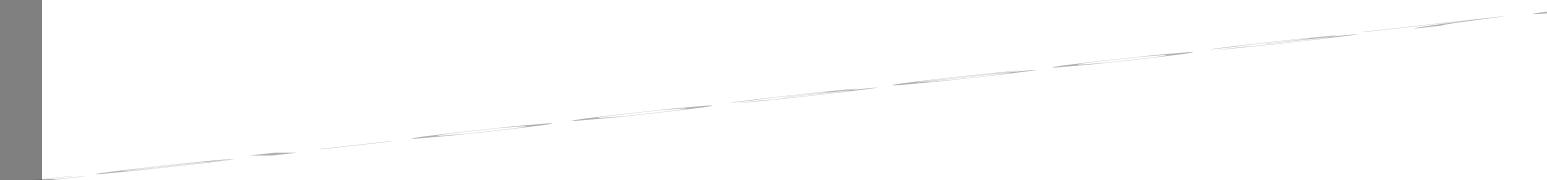
Fig. 4.24: Image synthétique composée de quatre photographies de surfaces préparées avec deudra

fixé à 0° (toutes les mesures sont dans le plan

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les



4. Intensité

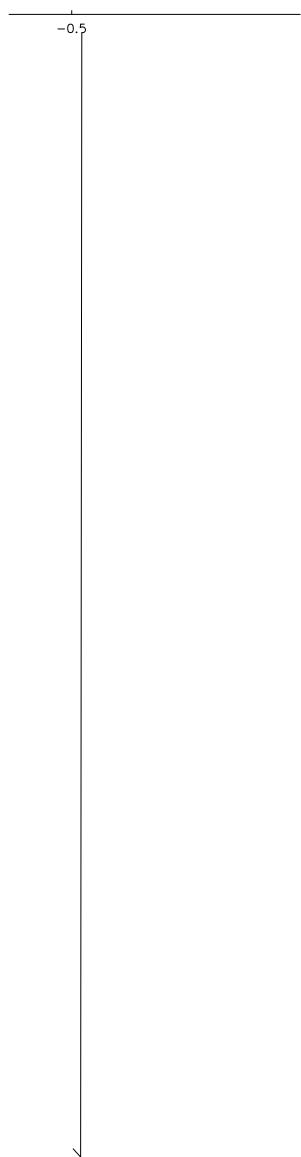


Éléments de la géométrie de mesure

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydratés :
texture et géométrie de la mesure

-1.

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydratés :
texture et géométrie de mesure



4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydratés :
texture et géométrie de mesure

plus rapidement

4. Intensité

E ets de la géométrie de

Modélisation avec un

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydratés :
texture et géométrie de mesure

déjà présentés pour

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydra

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydra

4. Intensité des bandes d'absorption de l'eau dans les minéraux hydratés :
texture

pôles, interprété comme un enrichissement du régolithe en eau adsorbée ou liée (Jougllet *et al.*, 2007; Milliken *et al.*, 2007). La plupart des observations OMEGA sont obtenues av

5. D

5. Développement du dispositif expérimental SERAC

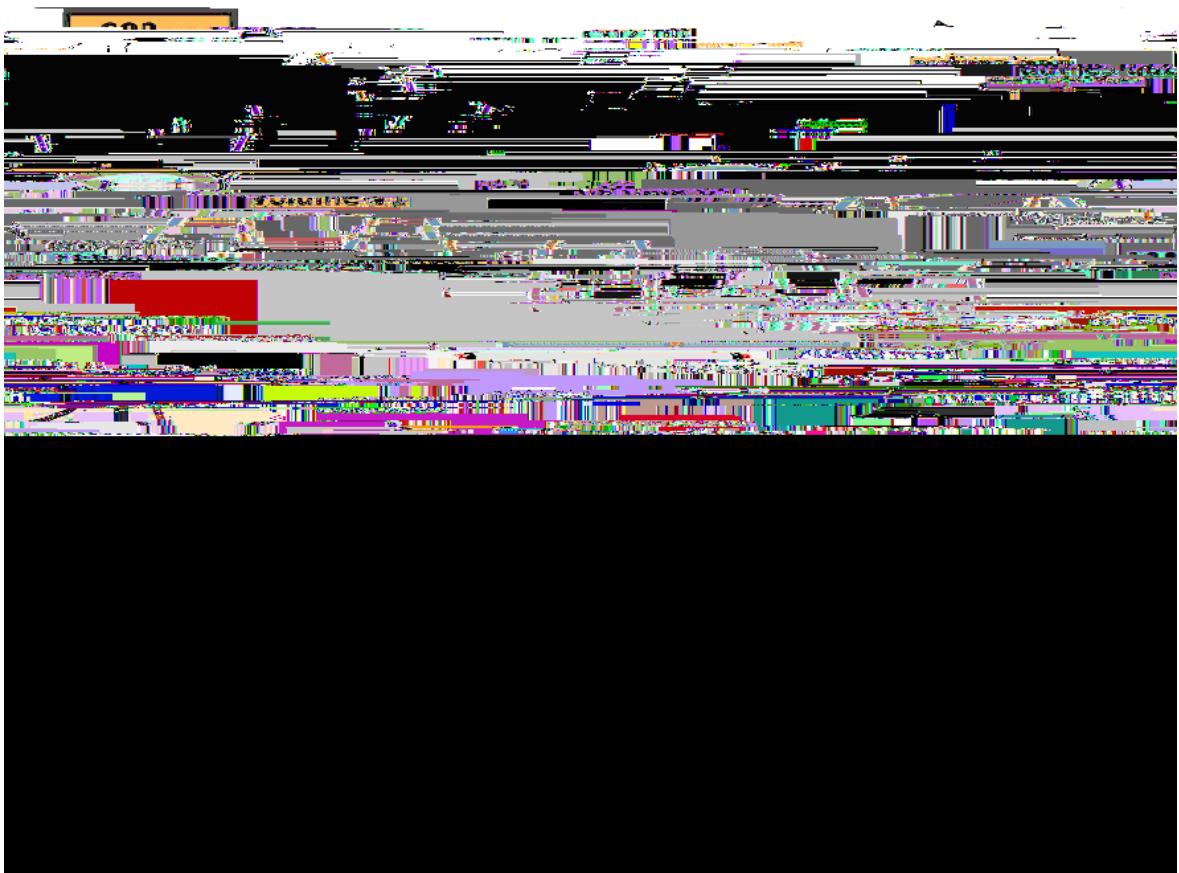


Fig. 5.1: Ebauche de schéma général du dispositif expérimental SERAC imaginé à la suite de la rédaction du cahier des charges en avril 2006.

aux mois de septembre et octobre. Nous avons réalisé l'assemblage initial entre le mois de novembre et le mois de décembre 2006.

5.2.1 Etudes préalables

Dimensionnement

Le dimensionnement des différents volumes (enceinte, échantillon, volume destiné à con-

Interface optique

Fig. 5.3: Deux vues de l'enceinte

5.

Gamme de
pression 1 Torr 10 Torr 10^{-2} Torr 10^{-}

des « microfuites » occasionnées soit par des jonctions usées car déjà montées et démontées plusieurs fois soit par un serrage du couteau en inox.

Enfin, les

expérimental oppelement du dispositif

al SERA

	2	Injection	1	3	4	5	6
10		10pression à l'équilibre (mbar)	7,7 ⁻⁴	3,1 ⁻³	8,6 10 ⁻³	5,3 10 ⁻²	9,5 10-

du flux incident sur la vitre d'une

5.

5. Développement du dispositif expérimental SERAC

dessiccation et d'une rétractation des surfaces.

Chapitre 6

Mesures spectroscopiques et thermodynamiques

6. Mesures spectroscopiques et

6. Mesures spectr



6. Mesures spectroscopiques et thermodynamiques sur le dispositif expérimental SERAC

Adsorption d'eau sur des analogues du sol martien : thermodynamique et spectroscopie

JSC Mars-1

Ferrihydrite

Smectite SWy-2

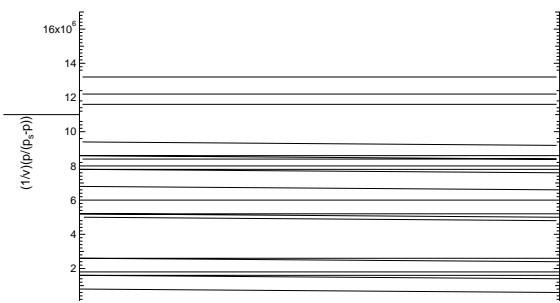
Dunite

Volcanic tu

6. Mesures spectroscopiques et thermodynamiques sur le dispositif

6. Mesures spectroscopiques et thermodynamiques sur le dispositif expérimental SERAC

	JSC Mars-1	Ferri- hydrite	Smectite SWy-2	Dunite	T ba- saltique	Tu + Mg-sulfate
Après déshydratation	5,0 %	4,3 %	1,2 %	0,2 %		



6. Mesures spectroscopiques et thermodynamiques sur

Adsorption d'eau sur des analogues

6. Mesures spectroscopiques et thermodynamiques sur le dispositif expérimental SERAC

[...]

1.0

Adsorption d'eau sur des analogues

6. Mesures spectroscopiques et thermodynamiques sur le dispositif expérimental SERAC

L

I

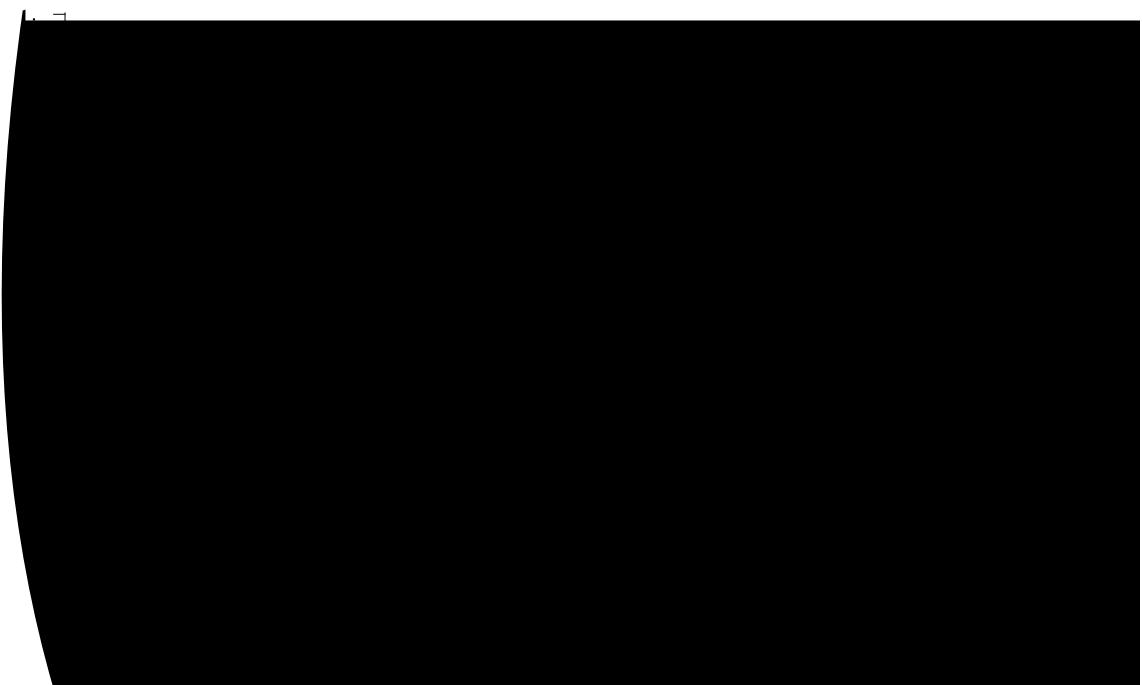
A

de la première monocouche de molécules d'eau ($p/p_s = 0,25$) et une augmentation continue mais plus lente à plus haute pression correspondant à la formation des couches multiples de molécules d'eau.

La microp715.283Tm(len)TjETBT10.90933.7656676.435Tm(oroisé)TjETBT10.90910010.9091168.846676.435

6. Mesures spectr

6. Mesures spectroscopiques et thermodynamiques sur le dispositif expérimental SERAC



Adsorption d'eau sur

6. Mesures spectr

Adsorption d'eau

6. Mesures spectroscopiques et thermodynamiques sur le dispositif expériment

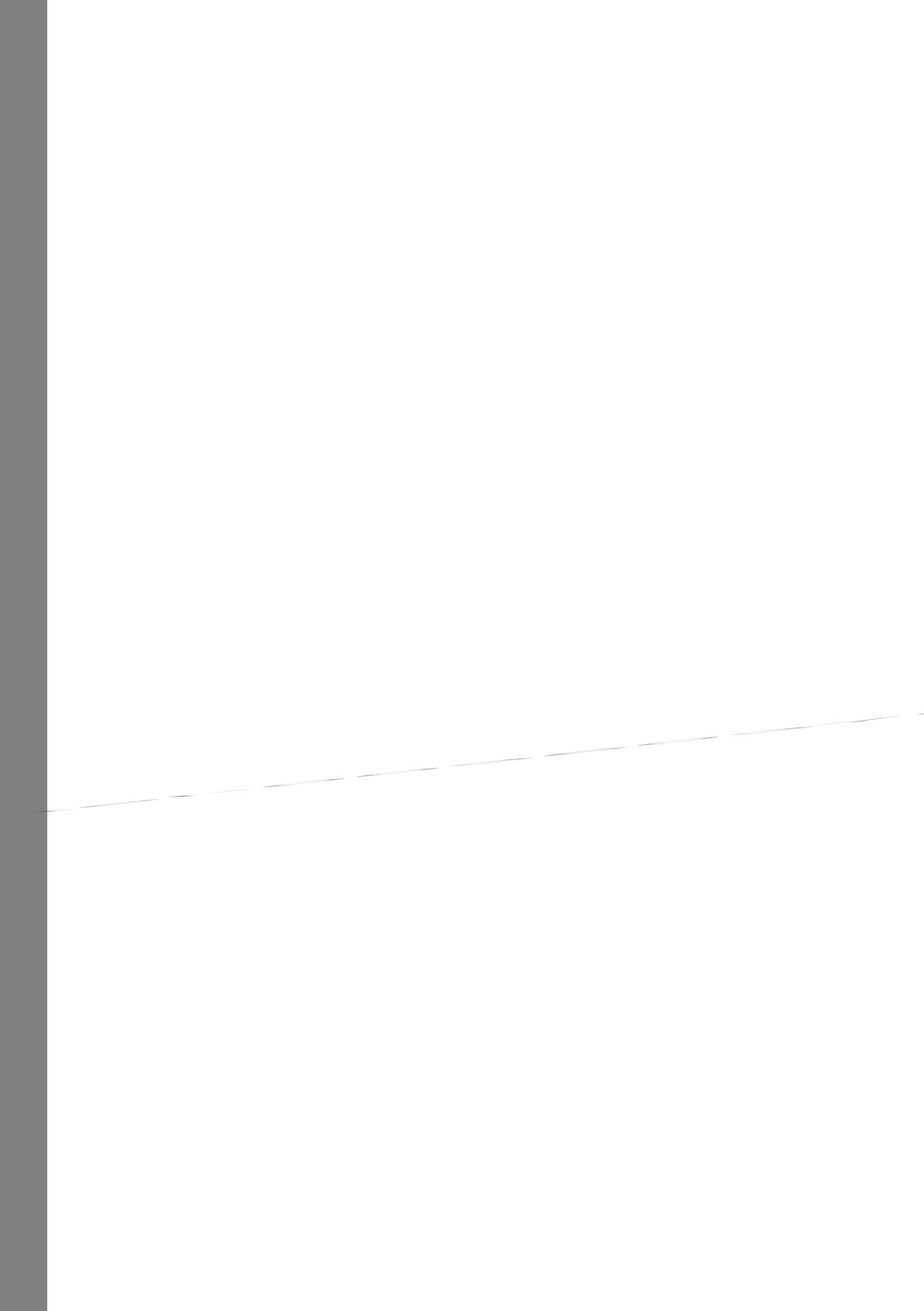
6. Mesures spectroscopiques et thermodynamiques sur le dispositif expérimental SERAC

Adsorption d'eau sur des analogues du sol martien : thermodynamique et spectroscopie

6. Mesures spectroscopiques et thermod

Cinétiques des échanges d'eau entre atmosphère et échantillon : adsorption et di

6. Mesures spectroscopiques et thermodynamiques sur le dispositif expérimental SERAC



6. Mesures spectroscopiques et thermodynamiques sur le dispositif expérimental SERAC

Cinétiques des échanges d'eau entre atmosphère et échantillon : adsorption et diffusion

6. Mesures spectroscopiques et thermod

même spectroscopique), il n'en pas de pour le processus de désorption. Ce dernier est en effet cessus à é

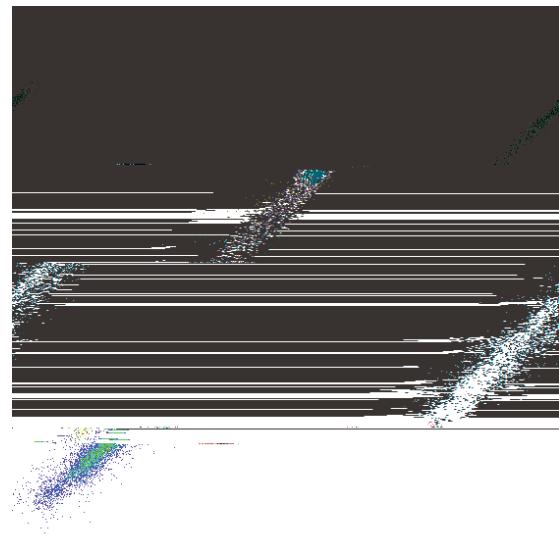
Chapitre 7

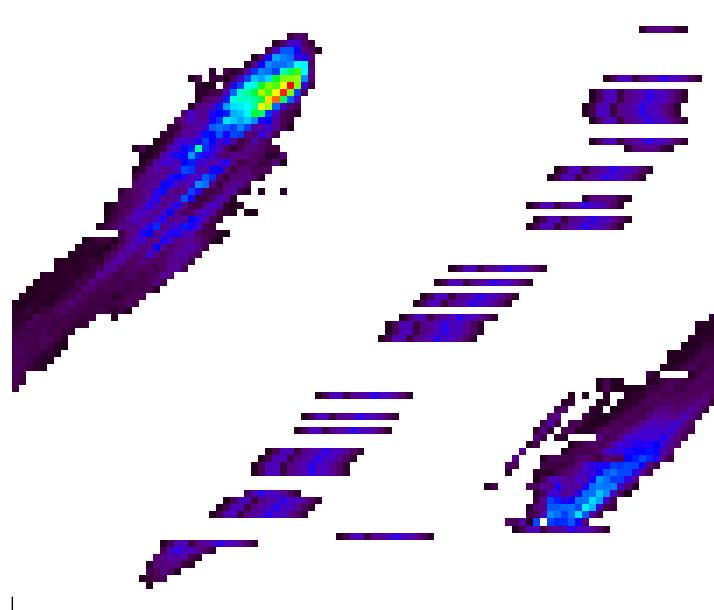
Nous utilisons désormais ces résultats pour étudier le cas de la surface martienne. Les relations entre l'albédo des surfaces

7. Application à la surface martienne

à partir de la voie V, la réalisation de cartes de glace d'eau et de CO₂ et de nuages de glace d'eau permet

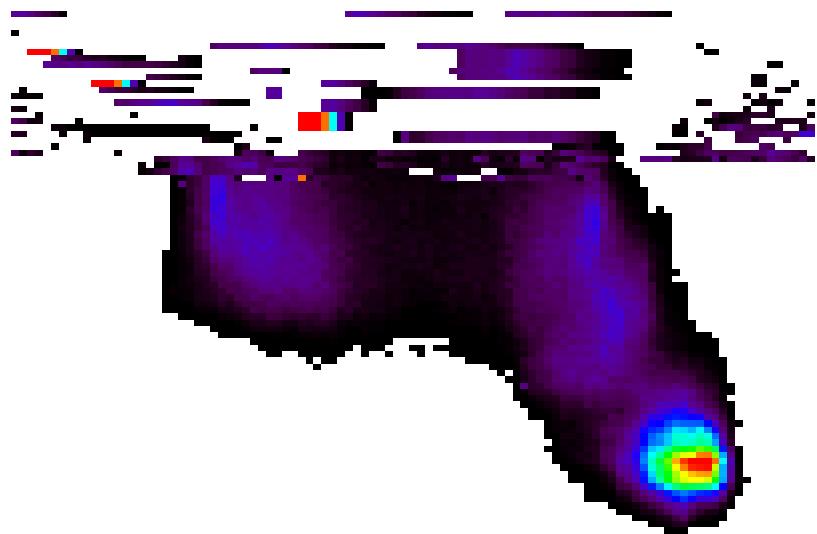
7. Application à la surface martienne





7. Application à la surface martienne

la présence de tendances linéaires para



7. Application à la surface martienne

80 unités SI), on

7.3 Variabilité temporelle des bandes d⁵hydratation

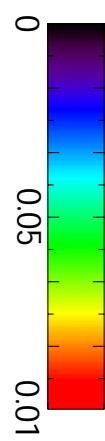
7.3.1 Introduction

Les résultats expérimentaux obtenus la facilité SERAC (chapitre 6) renseignent

En utilisant le critère spectral A



v



a) Absorption à 2,5 μm



b) Humidité relative

les vastes zones couvertes de fine poussière de l'hémisphère nord, impliquant une faible quantité d'eau adsorbée d'une part et des échanges d'eau avec l'atmosphère réduits

maximum situé en hiver à plus haute lati

Conclus

Conclusion générale et perspectives

photométrique mesuré. Ces effets empêchent à l'heure

Bibliographie

S. Guggenheim et A.F. Koster Van Groos : Baseline studies of the clay minerals society source clays : Thermal analysis. *Clays and Clay Minerals*, 49, 433–443, 2001.

K. Gunderson, B. Lüthi, P. Russel I et N. Thomas : Visible/NIR photometric signatures of liquid water in Martian regolith simulant. *Planet. Sp*

T. L. L.

J. F. Mustard, S. L. Murchie, S. M. Pelkey, B. L. Ehlmann, R. E. Milliken, J. A. Grant, J.-P. Bibring, F. Poulet, J. Bishop, E. N. Dobrea, L. Roach, F. Seelos, R. E. Arvidson, S. Wiseman, R. Green, C. Hash, D. Humm, E. Malaret, J. A. McGovern, K. Seelos, T.

Bibliographie

J. W. Salisbury et L. S. Walter : Thermal Infrared (2.5-13.5 μm) Sp

D. E. Smith, M. T. Zuber, S. C. Solomon, R. J. Phillips, J. W. Head, J. B. Garvin, W. B.

Publications et communications

- [8] M. Vincendon, Y. Langevin, A. Pommerol, M.J. Wolff, J.P. Bibring, B. Gondet, D. Jouglet et F. Poulet. Time Variations of Low Albedo Regions of Mars in the OMEGA/MEx Dataset. *39th Lunar and Planetary Science Conference*

Langevng, F.

Résumé