



# MODÉLISATION DE L'ENVIRONNEMENT MARTIEN EN PÉRIODE DE FAIBLE OBLIQUITÉ

Rapport de stage 3A  
Laboratoire de météorologie dynamique de Paris

1<sup>er</sup> juillet 2018

---

Auteur : Etienne Dupont  
Maître de stage : François Forget





## RÉSUMÉ

Ce rapport de stage porte sur l'étude de la surface et de l'atmosphère de Mars à l'aide de modèles de climat global (GCM). L'obliquité de la planète rouge est caractérisée par une évolution chaotique. Durant l'ère de l'Amazonien, à savoir les trois derniers milliards d'années, elle a atteint des valeurs basses voire très basses, entraînant d'importants changements climatiques. Dans de telles conditions, la condensation du dioxyde de carbone de l'atmosphère sur le sol entraîne la formation de glaciers dont la dynamique sculpte durablement les reliefs martiens. La composition de l'atmosphère est alors grandement modifiée : l'argon et l'azote, minoritaires aujourd'hui, occupent dans ces conditions une proportion plus importante, parfois prépondérante.

Pour simuler l'effondrement atmosphérique dû à la formation de glaciers permanents de  $CO_2$  sur des milliers d'années et avec une haute résolution spatiale, j'ai modifié le GCM de deux manières. Premièrement, le transport atmosphérique et la dynamique ont été paramétrés en utilisant une redistribution simplifiée du  $CO_2$  qui rend compte du cycle du  $CO_2$  sur le long terme. Deuxièmement, j'ai introduit une paramétrisation fine de la distribution de topographie sur des échelles kilométriques pour tenir compte des microclimats générés par les pentes locales. Avec cet outil, j'ai pu simuler, localiser et quantifier la formation de glaciers de  $CO_2$  et leur dynamique sur les pentes orientées vers les pôles à hautes latitudes comme suggéré dans [7]. J'ai aussi mis en évidence d'importantes variations annuelles et locales de composition atmosphérique dans les états finaux obtenus, qui encouragent une étude postérieure qui prendrait en compte le modèle complet de la dynamique et du transport au cours des saisons.

## ABSTRACT

This internship report deals with the study of Mars' surface and atmosphere thanks to Global Climate Models (GCM). Mars' obliquity is chaotic : during amazonian years - the past three thousand years - it reached very low values which brought important climate changes. In such extreme conditions, the condensation of atmospheric carbon dioxide on the ground lead to the formation of permanent glaciers of which dynamics erode martian reliefs lastingly . The atmospheric composition is then highly modified : argon and azote, which are marginal volatiles today, occupy a much more significant proportion.

To simulate the atmospheric collapse due to the formation of  $CO_2$  perennial glaciers over thousand of years end with high spatial resolution, I have modified the GCM in two ways. First, atmospheric dynamics and transport were parameterized using a simple redistribution of  $CO_2$  which gives an accurate account of the long term  $CO_2$  cycle. Second, I carefully introduced a detailed parametrization of the topography distribution at kilometer scale in order to account for the microclimate on local slopes. With such a tool I could simulate, map and quantify the formation of  $CO_2$  glaciers and their flow on high latitude poleward slopes as suggested in [7]. I also found important annual and local variations of the atmospheric composition in the final states obtained, which encourage a subsequent study that would take into account full dynamics and transport models.

## REMERCIEMENTS

---

Je tiens à remercier très chaleureusement François Forget qui est à l'initiative de mon projet de stage au Laboratoire de Météorologie Dynamique. En dépit de mes maigres connaissances dans le domaine de la planétologie au début de ce stage, il a fait preuve d'une grande patience et surtout d'une formidable pédagogie pour m'apprendre tout ou presque : des caractéristiques essentielles de la planète rouge jusqu'aux subtilités du modèle climatique et du langage Fortran. Malgré son investissement dans les missions spatiales, son poste à l'académie des sciences, les sollicitations reçues de toutes parts pour participer à des conférences, il est resté très attentif à mon travail et m'a grandement enrichi de ses qualités scientifiques et humaines.

Je voudrais remercier également tout ceux qui m'ont aussi apporté une aide et des conseils précieux lors de mon projet : Tanguy Bertrand, Margaux Vals, Ehouarn Millour, Karine Marquois. Je remercie également les autres stagiaires et amis du laboratoire qui m'ont aussi soutenu dans ce projet : Hugues Dellatre, Romain Fouchard, Arthur le Saux

Je remercie enfin l'équipe du Laboratoire qui m'a offert un excellent accueil.

## TABLE DES MATIÈRES

---

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>5</b>
1.1	La découverte et l'exploration de Mars . . . . .	5
1.2	Les caractéristiques générales de Mars actuelle . . . . .	5
1.3	L'obliquité : un enjeu majeur . . . . .	6
1.4	Mars à faible obliquité : l'étude de Kreslavsky and Head . . . . .	7
1.5	Objectifs du projet . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Le modèle numérique du climat martien</b>	<b>9</b>
2.1	Description du modèle du GCM sur Mars . . . . .	9
2.2	Un nouveau modèle de climat pour l'étude à faible obliquité . . . . .	10
2.2.1	Diminution de la fréquence de traitement . . . . .	10
2.2.2	Simplification de la dynamique du modèle . . . . .	10
2.2.3	La contribution des pentes . . . . .	12
2.2.4	L'écoulement des glaciers . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Résultats des simulations numériques</b>	<b>17</b>
3.1	Expériences réalisées . . . . .	17
3.1.1	Temps de simulation . . . . .	17
3.1.2	Etat initial . . . . .	18
3.2	Résultats des simulations . . . . .	18
3.2.1	Etude du modèle "smooth" . . . . .	18
3.2.2	Comparaison des modèles "smooth" et "rough" . . . . .	23
3.2.3	Impact de l'écoulement des glaciers . . . . .	23
3.2.4	Impact de l'albedo et de l'opacité . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>25</b>
4.1	Discussion . . . . .	25
4.2	Conclusion . . . . .	25



# 1

## INTRODUCTION

---

### 1.1 LA DÉCOUVERTE ET L'EXPLORATION DE MARS

---

Avant les années 1960, on ne sait encore que très peu de choses sur les caractéristiques de Mars. C'est l'invention du télescope au XVII<sup>e</sup> siècle qui initie la description de la planète rouge. Si la durée du jour martien est rapidement déterminée par Christiaan Huygens puis Giovanni Domenico Cassini, les premières avancées majeures concernant la description de Mars sont l'oeuvre de Frederick William Herschel, célèbre pour la découverte d'Uranus en 1781. Herschel mesure l'obliquité de Mars et postule la présence de saisons analogues à celles qu'on observe sur Terre en observant la formation et le retrait des calottes polaires. Il remarque aussi que les étoiles ne sont pas occultées par le bord du disque planétaire et en conclut l'existence d'une atmosphère ténue. Des observations postérieures permettent notamment de cartographier Mars (voir figure 1), de détecter le dioxyde de carbone atmosphérique et même d'envisager la présence d'océans, attribués à l'alternance de zones sombres et claires à la surface. Ces premières découvertes et la proximité de Mars à notre planète en ont fait un sujet d'étude privilégié et une destination idéale pour les missions spatiales. Après l'échec de plusieurs missions soviétiques entre 1961 et 1964, les sondes Mariner 4 puis Mariner 9 fournissent pour la première fois une multitude de données photographiques, à plusieurs longueurs d'ondes. Elles révèlent la présence de canyons, de volcans éteints et de lits de rivières ainsi que la survenue de tempêtes de poussière, preuves d'une riche activité géologique et atmosphérique. La possibilité d'une forme de vie sur Terre encourage la progression des missions spatiales et en 1976, Viking 1 est la première sonde à se poser sur le sol martien. Le *lander* ne découvre pas de forme de vie ou de fossiles sur son site d'atterrissement. En outre, les conditions de pression et de températures ne sont pas adaptées à la présence d'eau liquide, qui est considérée comme l'un des préalables essentiels à la vie. Cependant, de nombreuses traces d'érosion laissent toujours penser que ces conditions ont pu être réalisées dans l'histoire de la planète.

C'est pour répondre aux questions du passé martien et pour comprendre la richesse de l'activité martienne de manière plus générale que les modèles de simulations numériques sont nés à la fin du XX<sup>e</sup> siècle. En particulier, le laboratoire de météorologie dynamique fait partie des pionniers de la modélisation climatique de Mars et a créé un modèle de climat global adapté à Mars. Son fonctionnement sera détaillé dans la section 2.1.

### 1.2 LES CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DE MARS ACTUELLE

---

Mars est une des quatre planètes telluriques : comme la Terre, elle est composée essentiellement de roches et de métal. Son diamètre vaut 6779 km, environ la moitié de celui de la Terre et sa masse vaut  $6,24 \cdot 10^{23}$  kg soit à peine 10% de la masse terrestre. Comme conséquence immédiate de ces paramètres fondamentaux, la gravité sur Mars est plus faible que sur Terre, elle vaut  $3,72 \text{ m.s}^{-2}$ .

Concernant les caractéristiques orbitales, Mars est la quatrième planète par ordre de distance croissante au Soleil, située à une distance de celui-ci variant entre 1,384 et 1,664 UA : son orbite est excentrique. L'année martienne vaut 687 jours terrestres et la durée du jour est similaire à celle sur Terre, elle vaut 24 h 39 min 35 s.

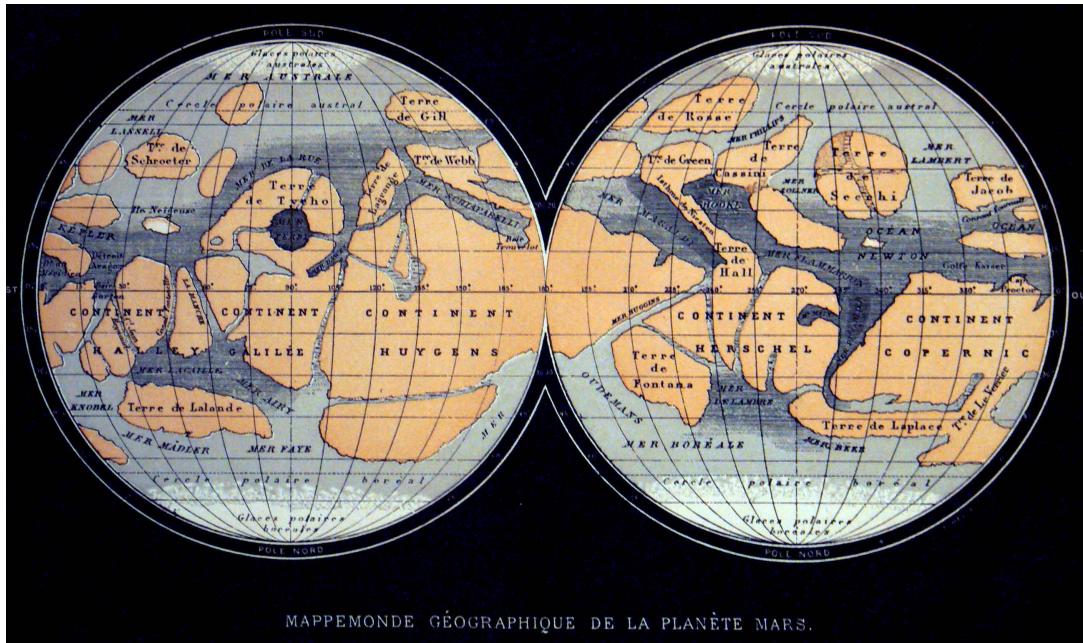


FIGURE 1 – Carte de Mars proposée par Camille Flammarion (*Les Terres du ciel*, 1877)

Une des différences majeures avec la Terre réside dans la composition de l’atmosphère. Elle d’abord beaucoup plus fine que celle de la Terre : la pression moyenne à la surface vaut 6 hPa. Elle est essentiellement composée de gaz carbonique (95%) et contient aussi de l’azote (2,7%), de l’argon (1,6%) et de l’oxygène (0,13%). La particularité de cette atmosphère tient dans le fait que les conditions de température et de pression sur Mars autorisent la condensation de son élément majoritaire à la surface, ce qui entraîne des variations locales et saisonnières de composition atmosphériques. Ainsi on trouve au niveau du pôle sud de la planète une calotte de glace de  $CO_2$  permanente, qui serait un héritage d’une ancienne période plus froide sur Mars, tandis qu’au cours de chaque année martienne on observe des dépôts saisonniers au niveau des deux pôles. On trouve en outre une grande quantité de poussière en suspension dans le ciel martien qui lui confère sa couleur orange, dont l’opacité engendre des phénomènes thermiques importants.

### 1.3 L’OBLIQUITÉ : UN ENJEU MAJEUR

L’obliquité de la planète Mars vaut  $25,2^\circ$ , c’est une valeur comparable à celle de la Terre ; cependant, cela n’a pas toujours été le cas. En effet, l’évolution de l’obliquité de la Terre est périodique, elle oscille entre  $21,8^\circ$  et  $24,4^\circ$  avec une période de 26000 ans. Mars possède au contraire obliquité à l’évolution chaotique : celle-ci valait environ  $15^\circ$  il y a 800000 ans (voir figure 3) et a probablement atteint des valeurs d’à peine quelques degrés pendant l’ère de l’amazonien [2]. Comme on sait les immenses variations climatiques qu’entraînent les petites oscillations de l’obliquité terrestre, on peut donc s’attendre à de véritables bouleversements climatiques sur Mars. Ces modifications dans le passé martiens pourraient expliquer certaines observations énigmatiques des sondes martiennes. Par exemple, la présence de traces s’apparentant à des moraines à hautes latitudes (figure 2) pourrait être

la conséquence de l'écoulement de glaciers qui ne pourraient exister dans les conditions actuelles d'obliquité, comme le propose Kreslavsky [7]. Une autre découverte des orbiteurs martiens pourrait être un enjeu majeur dans la détermination de la possibilité d'une forme de vie sur Mars. En 2011, le Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) chargé de sonder le sous-sol martien avec un radar, révèle la présence d'une importante quantité de CO<sub>2</sub> enfouie sous la surface du pôle sud : le dépôt occupe un volume de 9500 à 125000 km<sup>3</sup>, ce qui représente environ l'équivalent du CO<sub>2</sub> présent dans toute l'atmosphère [10]. Cette découverte constitue une énigme en ce que le phénomène de dépôt d'une telle quantité de CO<sub>2</sub> n'est pas bien compris : des conditions particulières ont dû être réunies pour que celui-ci soit stabilisé au cours du temps et ne se sublime pas dans l'atmosphère. Comprendre ce phénomène permettrait d'envisager des époques passées ou futures pendant lesquelles l'atmosphère, deux fois plus épaisse et animée d'une dynamique et d'un transport plus intenses, autoriserait la présence d'eau liquide en surface. L'étude de Mars dans les dernières périodes froides de faible obliquité semble être une piste privilégiée pour mieux comprendre cette observation.

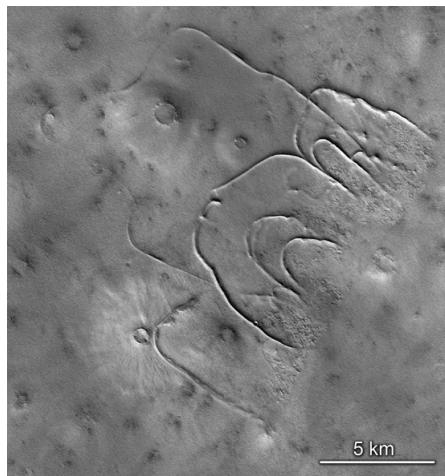


FIGURE 2 – Moraines caractéristiques de glaciers sur la surface de Mars à la latitude 71°N (*Kreslavsky 2005* [8])

#### 1.4 MARS À FAIBLE OBLIQUITÉ : L'ÉTUDE DE KRESLAVSKY AND HEAD

Malgré son intérêt non négligeable pour l'étude de Mars, le cas de faible obliquité n'a été que très peu traité dans la littérature scientifique. La référence dans ce domaine reste le papier de Kreslavsky et Head en 2005 sur l'effondrement de l'atmosphère à faible obliquité [7]. La démarche reste volontairement qualitative, ils utilisent un simple modèle d'équilibre radiatif, en considérant que la température moyenne de surface est égale à celle du point de condensation du CO<sub>2</sub> et sans considérer les effets dynamiques de l'atmosphère, ni l'écoulement de la glace de CO<sub>2</sub>, l'effet de l'opacité due à la poussière, la diffraction par la poussière, l'inertie thermique du sous-sol, les flux thermiques infrarouges, les variations de l'albedo. Ils tirent les conclusions suivantes :

- Quand l'obliquité descend sous une certaine valeur (environ 5°), tout le CO<sub>2</sub> est condensé à la surface et il persiste une atmosphère résiduelle d'argon et d'azote de 0.25 mbar de pression.

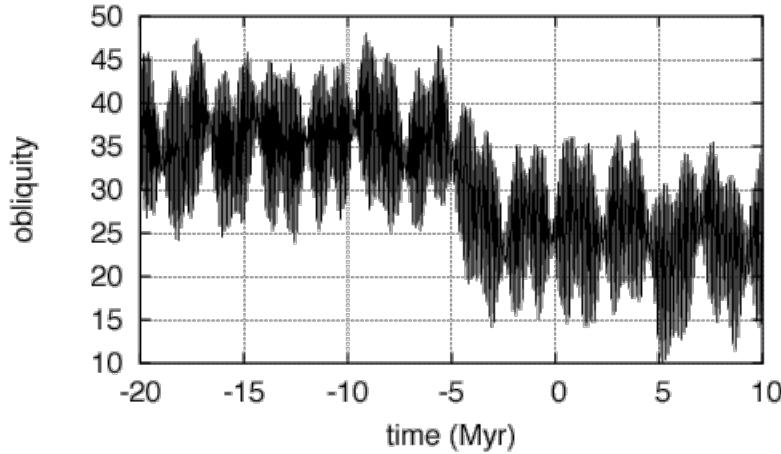


FIGURE 3 – Evolution de l’obliquité martienne pendant les 20 derniers millions d’années (*Laskar 2004* [2])

- A faible obliquité, la topographie de surface joue un rôle majeur dans le processus de condensation / sublimation du CO<sub>2</sub>. Les dépôts de CO<sub>2</sub> sont formés sur les pentes **raides** orientées vers les pôles, à latitude relativement élevée, plutôt qu’au niveau des pôles eux-mêmes comme c’est le cas lorsque les pentes locales ne sont pas considérées.
- La masse totale des dépôts dépend davantage de l’histoire du système climatique que des variations d’obliquité : pour une même obliquité, la masse finale déposée dépend de l’état initial. On observe en particulier lors des changement d’une obliquité basse à une obliquité élevée de larges hystérésis au niveau de la masse de CO<sub>2</sub> condensée à la surface, **dues au fait que le CO<sub>2</sub> condensé est très localisé et que le taux de sublimation total est proportionnel à la surface**.

L’étude de Kreslavsky et Head est intéressante car elle montre que la prise en compte des pentes locales est importante dans l’étude de Mars à faible obliquité en ce qu’elle a des effets durables sur la masse et la localisation des dépôts.

## 1.5 OBJECTIFS DU PROJET

---

Mon travail d’investigation et de modélisation s’est concentré sur l’étude de l’atmosphère et de la surface de Mars en conditions de faible obliquité et sur des échelles de temps de plusieurs milliers d’années. A la lumière de la lecture de Kreslavsky et Head, l’objectif du projet est de fournir une étude quantitative de la condensation du CO<sub>2</sub> atmosphérique à la surface de Mars dans des conditions de faible obliquité : il s’agit de localiser les dépôts et d’estimer leur masse et leur évolution à partir d’un même état initial, pour plusieurs valeurs d’obliquité. **On ne prendra pas en compte la variation d’obliquité car elle est minime sur de telles échelles de temps.** De même, pour n’étudier que l’effet de l’obliquité, nous nous restreindrons au cas d’une orbite circulaire.

## 2

## LE MODÈLE NUMÉRIQUE DU CLIMAT MARTIEN

### 2.1 DESCRIPTION DU MODÈLE DU GCM SUR MARS

Le modèle du GCM martien est développé par l'équipe de planétologie du LMD sur la base des modèles existant sur Terre à la fin du  $XX^e$  siècle (voir [15]).

Ce modèle est basé sur une représentation géométrique de la planète par des mailles définies par une grille discrète latitude/longitude/altitude (figure 4) :

- la grille horizontale typique dans les simulation est composée de 48 mailles latitudinales pour une longitude donnée et de 64 mailles longitudinales pour une latitude donnée, espacées régulièrement, ce qui correspond à une résolution d'environ 150 km en longitude et 50 km en latitude.
- L'axe vertical utilise un système de coordonnées "sigma" : chaque couche est définie par la valeur d'une constante  $\sigma = P/P_s$ , avec  $P$  la pression de couche et  $P_s$  la pression de surface ;  $\sigma$  est donc compris entre 0 et 1. On peut aussi utiliser un système de coordonnées hybrides qui utilise les coordonnées sigma proche de la surface et des coordonnées de pression à plus haute altitude. Un nombre de niveaux typique dans les simulation est de 29.

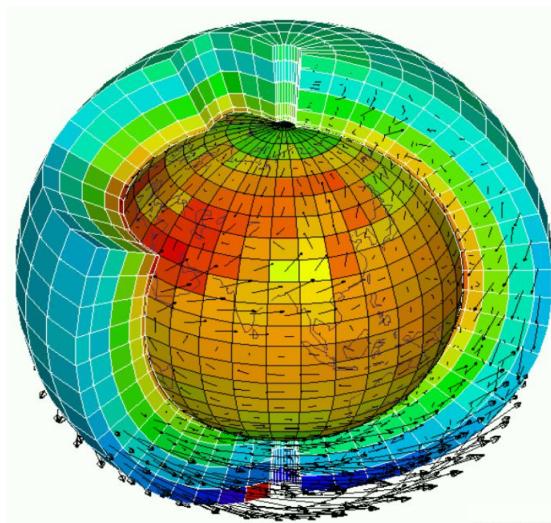


FIGURE 4 – Dessin de la géométrie du GCM (*Fairhead LMD/IPSL*)

Le modèle fonctionne à partir de deux routines distinctes qu'il appelle à chaque pas de temps :

- La routine physique traite à intervalle de temps donné les différents processus physiques à l'œuvre comme la condensation au sol, la condensation dans l'atmosphère, le transfert radiatif ou encore la conduction dans le sous-sol. Elle opère en 1D, en traitant indépendamment chaque colonne verticale de la grille. Cette routine est spécifique à chaque planète ; pour Mars par exemple, elle traite le transfert radiatif et la distribution de la poussière.
- La routine dynamique traite l'intégration temporelle et spatiale des équations de la dynamique des fluides. Elle résout les équations de Navier-Stokes en 3D pour la circulation atmosphérique

en prenant en compte les phénomènes de diffusion turbulente et de convection dans la couche limite; c'est donc elle qui assure la "communication" entre les colonnes verticales de la grille. Les deux routines traduisent des tendances sur les variables d'états et sur les variables dynamiques dans l'intervalle de temps considéré, ces tendances sont ensuite intégrées par le modèle et le même schéma se répète au pas de temps suivant. L'ensemble des processus pris en compte dans le modèle est détaillé dans le papier de Forget et al [15].

## 2.2 UN NOUVEAU MODÈLE DE CLIMAT POUR L'ÉTUDE À FAIBLE OBLIQUITÉ

Mon travail de stage a consisté à concevoir un nouveau modèle répondant aux contraintes suivantes :

- Le modèle doit pouvoir simuler la planète Mars sur des échelles de plusieurs milliers d'années en un temps raisonnable (de l'ordre de la journée).
- Il doit intégrer le calcul de l'insolation en fonction des caractéristiques topographiques, à savoir la pente locale.
- Il doit pouvoir traiter les pentes locales de manière précise, c'est à dire sur des échelles subkilométrique, bien plus petites que la résolution horizontale des mailles.
- Il doit pouvoir prendre en compte l'écoulement des glaciers de CO<sub>2</sub> éventuellement formés.

La principale difficulté dans ce travail a été de réussir à accélérer le modèle tout en traitant des phénomènes comme la condensation sur les pentes avec une résolution très fine. J'ai donc créé un nouveau modèle à partir du GCM décrit plus haut, choisi dans une résolution de grille horizontale de 32 en longitude pour 48 en latitude.

### 2.2.1 • DIMINUTION DE LA FRÉQUENCE DE TRAITEMENT

Le modèle initial du GCM fonctionne typiquement avec 96 pas de temps par jour martien. Cela permet de rendre compte assez finement des variations climatiques journalières tout en donnant des résultats assez précis. Cependant, dans notre cas, nous ne souhaitons pas rendre compte du cycle diurne mais plutôt des transformations générales concernant la distribution de CO<sub>2</sub> à la surface sur de longues périodes de temps. Par conséquent nous avons pu diminuer drastiquement le nombre de pas de temps par jour, notamment en exploitant une fonction du GCM qui permet d'effectuer les calculs radiatifs en moyenne diurne. Toutefois, les conditions extrêmes de faible obliquité causant des problèmes de stabilité, nous avons modifié les routines de calcul des variables d'état sensibles, comme la température de surface, en intégrant un système de sous pas de temps et en passant d'un schéma d'intégration explicite à un schéma implicite. Nous avons ainsi pu conserver un modèle stable avec un seul pas de temps par période de 10 jours.

### 2.2.2 • SIMPLIFICATION DE LA DYNAMIQUE DU MODÈLE

Le cœur dynamique du GCM est de loin la partie la plus chronophage du modèle, car c'est lui qui traite tous les phénomènes de transport sur l'intégralité de la grille à partir de la résolution des équations de Navier-Stokes. La dynamique de l'atmosphère est un élément crucial de la simulation car c'est elle qui permet le transport de matière et d'énergie entre les colonnes verticales de la grille. Cependant, dans les conditions de faible obliquité, l'effondrement de l'atmosphère provoque nécessairement une baisse significative de l'activité atmosphérique. La première conclusion à tirer de cette conséquence est que la résolution verticale du modèle peut être largement diminuée par rapport aux simulations

standards. Nous avons donc travaillé par la suite sur le modèle avec 3 couches verticales.

Concernant le transport dynamique horizontal, nous avons choisi de simplifier celui-ci de manière à reproduire les effets moyens de la dynamique sans résoudre les équations de la dynamique des fluides. Pour cela, nous avons remplacé le schéma dynamique initial par une redistribution des variables d'état par un schéma de type rappel Newtonien vers la moyenne. J'ai appliqué cette redistribution pour la pression de surface, le rapport de mélange de CO<sub>2</sub> et la température potentielle. Je détaille ci dessous la démarche théorique d'une telle redistribution.

### Redistribution de la température potentielle

Pour ce cas et dans la suite, on se place dans l'une des trois couches verticales de l'atmosphère (le raisonnement est le même dans chacune). La température potentielle  $\theta$  est définie comme la température qu'aurait une masse d'air après une transformation adiabatique vers la pression de surface. On préfère généralement utiliser cette variable d'état plutôt que la température usuelle. Par définition (en considérant le gaz comme étant parfait) on a donc pour tout pas de temps  $t$  et pour toute maille de la grille horizontale  $i$  :

$$\theta_i(t) = T(t) \left( \frac{Ps_i(t)}{P_i(t)} \right)^{\frac{R}{C_p}} \quad (1)$$

Où  $T$  est la température usuelle,  $Ps_i$  la pression de surface de la maille  $i$ ,  $P_i$  la pression de la couche considérée pour la maille  $i$ ,  $R$  la constante des gaz parfait pour l'atmosphère martien,  $C_p$  la chaleur massique à pression constante de l'atmosphère martien.

On définit le rappel newtonien appliqué à  $\theta$  entre  $t$  et  $t + \delta t$  :

$$\theta_i(t + \delta t) = \theta_i(t) + (\bar{\theta}(t) - \theta_i(t)) \left( 1 - e^{-\frac{\delta t}{\tau_\theta}} \right) \quad (2)$$

Où  $\tau_\theta$  est une constante de temps caractéristique de la redistribution et  $\bar{\theta}$  est défini par la contrainte de conservation de l'énergie dans la couche considérée. Celle-ci s'écrit au temps  $t$  :

$$H(t) = C_p \sum_i T_i(t) m_i = C_p \sum_i T_i(t) \frac{\Delta P_i(t)}{g} A_i \quad (3)$$

Où  $m_i$  est la masse de la couche considérée pour la maille  $i$ ,  $\Delta P_i$  est la différence de pression entre le haut et le bas de la couche,  $g$  la gravité sur Mars,  $A_i$  l'aire de la maille  $i$ . Comme on définit les couches par les coordonnées sigma  $\sigma = P/P_s$ , on peut réécrire la quantité précédente :

$$H(t) = C_p \sum_i \theta_i(t) \sigma^{\frac{R}{C_p}} \frac{\Delta P_i(t)}{g} A_i = \frac{C_p \sigma^{\frac{R}{C_p}}}{g} \sum_i \theta_i(t) \Delta P_i(t) A_i \quad (4)$$

L'égalité  $H(t) = H(t + \delta t)$  donne en regard de l'équation de rappel (2) :

$$\bar{\theta}(t) = \frac{\sum_i \theta_i(t) \Delta P_i(t) A_i}{\sum_i \Delta P_i(t) A_i} = \frac{\langle \theta(t) \Delta P(t) \rangle}{\langle \Delta P(t) \rangle} \quad (5)$$

Où  $f \rightarrow \langle f \rangle$  désigne l'opérateur de moyenne surfacique. Le dernier paramètre à déterminer est arbitraire, c'est la constante de temps  $\tau_\theta$ . Nous l'avons fixée à  $10^{-7}s$  en comparant les simulations avec celles du GCM prenant en compte la dynamique "exacte".

### Redistribution du rapport de mélange de CO<sub>2</sub>

Le principe est le même que pour la température potentielle, on définit donc une quantité  $\bar{q}$  et une constante de temps  $\tau_P$  telles qu'on ait entre  $t$  et  $t + \delta t$  en chaque maille  $i$  :

$$q_i(t + \delta t) = q_i(t) + (\bar{q}(t) - q_i(t)) \left(1 - e^{\frac{\delta t}{\tau_q}}\right) \quad (6)$$

On constraint  $\bar{q}$  par la conservation de la masse de CO<sub>2</sub> dans la couche :

$$M(t) = \sum_i \frac{q_i \Delta P_i(t)}{g} A_i \quad (7)$$

L'égalité  $M(t) = M(t + \delta t)$  permet d'obtenir :

$$\bar{q}(t) = \frac{\langle \Delta P(t) q(t) \rangle}{\langle \Delta P(t) \rangle} \quad (8)$$

Comme pour le cas précédent, les simulations avec le GCM nous ont permis d'estimer la valeur de  $\tau_q$  : nous l'avons fixé à  $10^5 s$ .

### Redistribution de la pression de surface

Pour la pression de surface, on souhaite tenir compte de la topographie. On rappelle la pression vers  $P_0 k_i$  avec  $k_i = e^{-\frac{z_i g}{RT}}$  et on définit la constante de temps  $\tau_p$ . On a donc entre  $t$  et  $t + \delta t$  en chaque maille  $i$  :

$$Ps_i(t + \delta t) = Ps_i(t) + (P_0 k_i(t) - Ps_i(t)) \left(1 - e^{\frac{\delta t}{\tau_p}}\right) \quad (9)$$

La contrainte de la conservation de la masse totale permet alors d'obtenir :

$$P_0 = \frac{\langle Ps(t) \rangle}{\langle k(t) \rangle} \quad (10)$$

Après comparaison avec les simulations du GCM, nous avons choisi de prendre  $\tau_p = 10^5 s$ .

#### 2.2.3 • LA CONTRIBUTION DES PENTES

Dans l'étude qu'il mène sur l'effondrement de l'atmosphère en période de faible obliquité, Krevlavsky [7] insiste sur le rôle des pentes locales sur le bilan thermique au niveau de la surface. Il écrit un tel bilan en moyenne journalière comme suit :

$$\frac{dM}{dt} L = E \sigma_{SB} T_{CO_2}^4 - (1 - A) S, \quad (11)$$

où  $M$  désigne la mass de la colonne de CO<sub>2</sub> solide par unité de surface,  $t$  est le temps,  $L$  la chaleur latente de sublimation du CO<sub>2</sub>,  $E$  l'émissivité effective thermique infrarouge,  $\sigma_{SB}$  la constante de Stephan-Boltzmann,  $T_{CO_2}$  la température du point de condensation du CO<sub>2</sub> à pression donnée,  $A$  l'albedo visible et  $S$  l'insolation moyenne journalière. Les deux paramètres dépendants de la pente locale sont alors  $S$  et  $E$ . Définissons pour une pente donnée, l'inclinaison  $\theta$  comme étant l'angle entre la verticale locale et la normale à la surface et l'orientation  $\psi$  comme étant l'angle entre les projetés de l'axe Nord-Sud et de la normale à la surface sur le plan horizontal local. Dans cet article et dans l'article concernant la formation de glaciers de CO<sub>2</sub> en période de faible obliquité [8] Krevlavsky suggère le résultat suivant :

- Dans l'hémisphère nord, l'insolation moyenne  $S$  est d'autant plus faible que la pente locale est fortement inclinée (soit que  $\theta$  est proche de  $90^\circ$ ) et qu'elle est orientée vers le Nord (soit que  $\psi$  est proche de  $0^\circ$ )
- Dans l'hémisphère sud, l'insolation moyenne  $S$  est d'autant plus faible que la pente locale est fortement inclinée (soit que  $\theta$  est proche de  $90^\circ$ ) et qu'elle est orientée vers le Sud (soit que  $\psi$  est proche de  $0^\circ$ )

### Sensibilité de l'insolation aux caractéristiques des pentes

Pour me convaincre qualitativement de ce résultat, et tenter de trouver un paramètre pertinent reliant les pentes à leur insolation moyenne, j'ai utilisé le modèle climatique unidimensionnel du LMD dans lequel le calcul de l'insolation sur les pentes est réalisé conformément au papier de Spiga et Forget [16] selon une méthode de simulation de Monte Carlo. J'ai écrit un algorithme permettant de moyenner l'insolation calculée par le modèle sur une journée martienne pour un ensemble discret de valeurs d'orientations  $\psi$  et d'inclinaison  $\theta$  de pente, pour pouvoir ensuite tracer l'insolation moyenne  $S$  en fonction du projeté de l'orientation sur l'axe Nord-Sud, soit  $\cos(\psi)$ . Le résultat pour une surface située à la latitude  $30^\circ N$  et une longitude solaire initiale de  $0^\circ$  est présenté figure 5. On obtient qualitativement un flux moyen qui a la forme suivante :

$$S = S_0 - k_0 \theta \cos(\psi) \quad (12)$$

Où  $S_0$  et  $k_0$  seraient constantes. Par conséquent, ce résultat même s'il reste qualitatif, est bien en accord avec l'hypothèse de Krevlavsky. En outre, on a mis ici en lumière une corrélation entre le paramètre  $\mu = \theta \cos(\psi)$  et l'insolation moyenne reçue  $S$ . Le paramètre  $\mu$  nous permettra par la suite de regrouper les différentes pentes selon qu'elles reçoivent plus ou moins d'ensoleillement en moyenne.

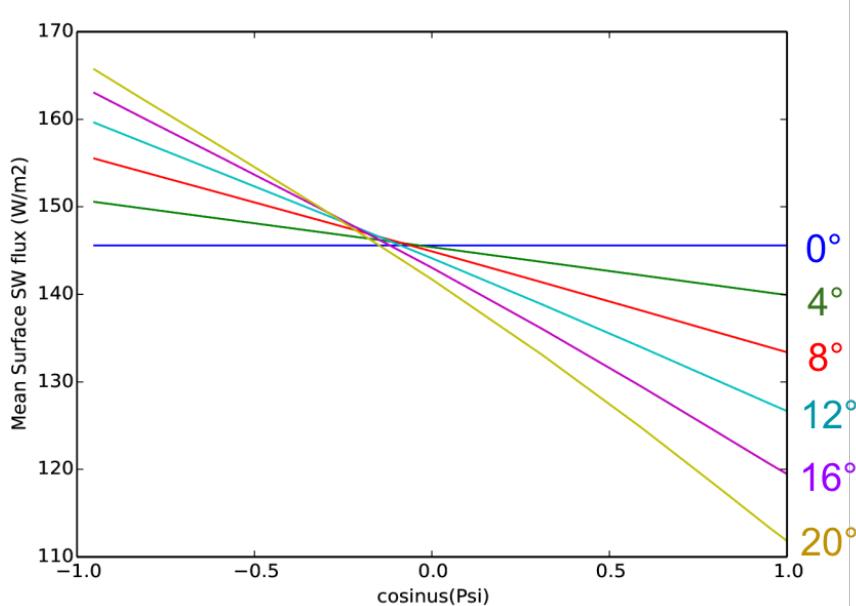


FIGURE 5 – Flux moyen reçu sur la surface pour différentes valeurs d'inclinaison

### Traitement des pentes sous maille

Le traitement des pentes est rendu compliqué par les contraintes d'efficacité du modèle. En effet, le calcul des pentes locales nécessite d'employer des échelles spécifiques de distances. D'une part, la pente moyenne d'une maille de **150 km** de côté n'est pas représentative des pentes locales sous la maille. D'autre part, Kreslavsky et Head expliquent dans leur papier [7] l'importance de ne pas considérer les pentes avec une résolution trop grande pour pouvoir s'abstenir de la modification de la topographie engendrée par l'accumulation de glace de CO<sub>2</sub>. Ils choisissent de calculer les pentes sur des échelles kilométriques. Cependant, il était inenvisageable pour nous de diviser la taille des mailles par 100, ce qui multiplierait le temps de calcul d'un facteur 10000. Nous avons donc trouvé un compromis permettant de s'affranchir d'une augmentation de résolution en opérant une statistique sur les pentes sous mailles. A la lumière de l'étude préalable sur la sensibilité de l'insolation aux paramètres des pentes, nous avons choisi d'allouer à chaque maille un tableau caractéristique qui donne la distribution des pentes selon leur paramètre  $\mu = \theta \cos(\psi)$  explicité ci-dessus. En d'autres termes, on sépare chaque maille en 7 pentes caractéristiques occupant chacune l'aire correspondant à leur proportion (figure 6).

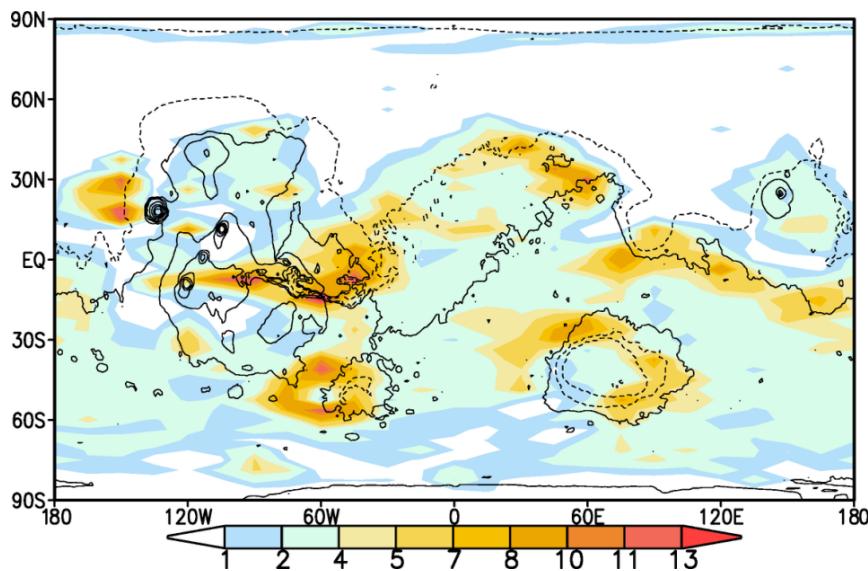
indice	contenu	pente caractéristique associée
1	% pentes avec $-43^\circ \leq \mu < -20^\circ$	$\mu = -31.5^\circ$
2	% pentes avec $-20^\circ \leq \mu < -9^\circ$	$\mu = -14.5^\circ$
3	% pentes avec $-9^\circ \leq \mu < -3^\circ$	$\mu = -6^\circ$
4	% pentes avec $-3^\circ \leq \mu < 3^\circ$	$\mu = 0^\circ$
5	% pentes avec $3^\circ \leq \mu < 9^\circ$	$\mu = 6^\circ$
6	% pentes avec $9^\circ \leq \mu < 20^\circ$	$\mu = 14.5^\circ$
7	% pentes avec $20^\circ \leq \mu < 43^\circ$	$\mu = 31.5^\circ$

FIGURE 6 – Schéma du tableau caractéristique des pentes utilisé dans nos simulations

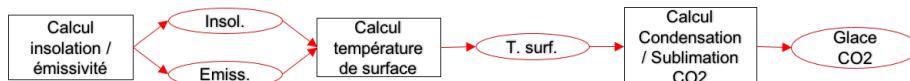
Pour prendre en compte les pentes de manière précise, j'ai utilisé les données issues du radar MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) qui **sonde** la topographie de Mars. Le satellite mesure le niveau de la surface avec une résolution de 32 points par degré, ce qui correspond à un espacement de l'ordre du kilomètre entre chaque point. Les données sont récoltées sous la forme d'un tableau associant aux coordonnées (*longitude, latitude*) des points leur altitude. J'ai ensuite développé un algorithme utilisant ces données pour calculer les pentes locales en chaque point du tableau MOLA puis pour associer à chaque maille de la grille son tableau caractéristique. La figure 7 donne un exemple de carte de pentes locales obtenu.

### L'intégration des pentes au modèle

Le principe du GCM initial est qu'à chaque maille est associée une seule valeur pour chaque variable d'état. Pour utiliser à bon escient la statistique des pentes sous maille, j'ai transformé les variables du GCM initial pour que le calcul des paramètres *E* et *S* de l'équation 11 soit effectué séparément pour chaque pente caractéristique. Le principe est explicité dans le schéma 8.

FIGURE 7 – Carte des proportions de pentes pour  $3^\circ \leq \mu < 9^\circ$  (%)

Modèle initial sans contribution des pentes



Nouveau modèle avec contribution des pentes

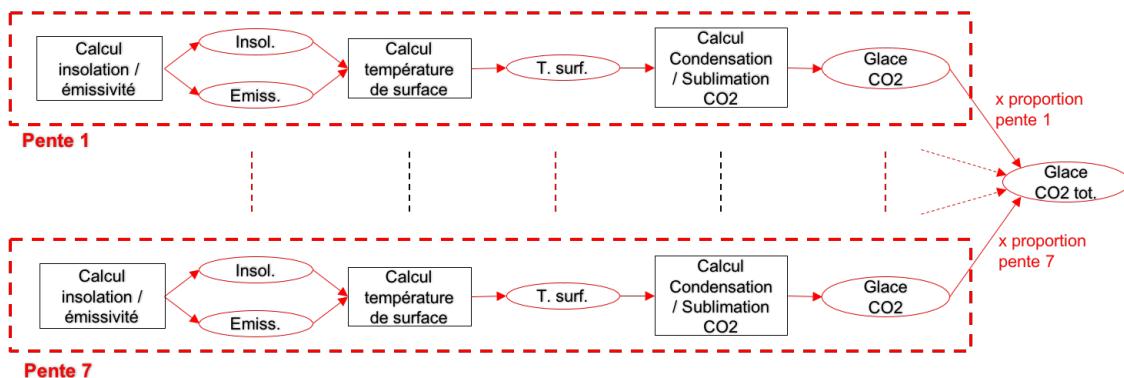


FIGURE 8 – Schéma explicatif du traitement des pentes dans le nouveau modèle

#### 2.2.4 • L’ÉCOULEMENT DES GLACIERS

De manière analogue à la dynamique des glaciers d'eau sur Terre, on peut s'attendre à observer un phénomène d'écoulement pour les glaciers de CO<sub>2</sub> sur Mars. En plus de rendre mieux compte de la réalité, la prise en compte de ce phénomène est importante car il constitue un effet inhibiteur de l'accumulation de CO<sub>2</sub> sur les pentes et donc a une influence sur la distribution globale de CO<sub>2</sub> au cours du temps. L'étude de Fastook [?] (figure 9), basée sur la rhéologie du CO<sub>2</sub> solide, met en avant

la sensibilité du profil et de la vitesse d'avancée d'un glacier de CO<sub>2</sub> en fonction de la pente. Il montre que l'inclinaison de la pente a une influence considérable sur l'épaisseur maximale du glacier de CO<sub>2</sub>.

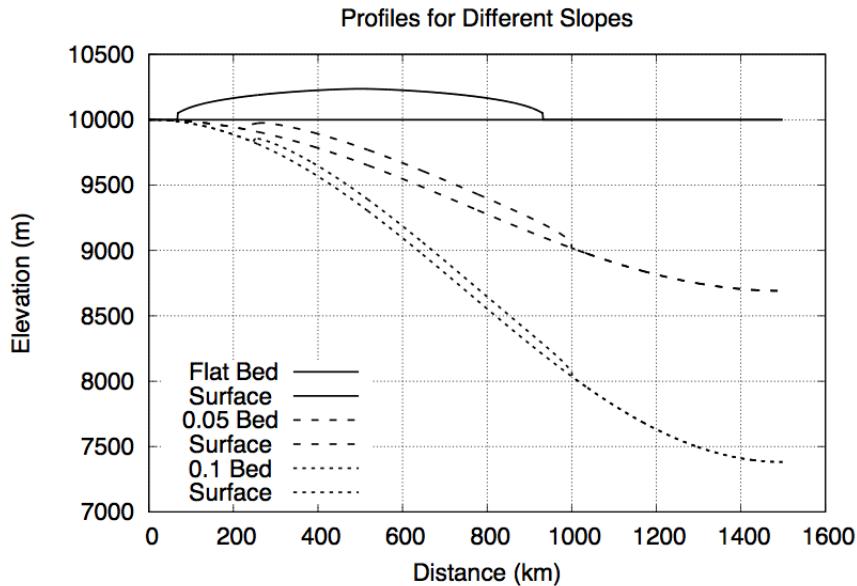


FIGURE 9 – Profil de glaciers sur une pente de 0°, 0.05°, 0.1° (*Fastook 2017*)

Comme dans notre modèle les pentes caractéristiques non plates ont des valeurs de  $\mu$  supérieures à 6°, celui-ci constitue un regroupement assez grossier des pentes pour pouvoir utiliser un schéma simple d'écoulement. Nous avons décidé d'une épaisseur maximale de dépôt de CO<sub>2</sub> pour les pentes caractéristiques non plates (*i.e.* avec  $\mu \neq 0$ ). On s'attend naturellement à ce que les pentes les plus "raides", avec le paramètre  $\mu$  le plus extrême, soient les plus privilégiées pour la condensation du CO<sub>2</sub>. Ainsi, une fois l'épaisseur limite atteinte, l'excédent de CO<sub>2</sub> condensé à chaque pas de temps est transmis directement à la pente caractéristique "voisine moins raide", c'est à dire avec le paramètre  $\mu$  voisin et inférieur en module. Une fois toutes les pentes caractéristiques non plates remplies, l'excédent se dépose sur la pente caractéristique plate. D'après nos estimations, pour les échelles de temps considérées, l'épaisseur des glaciers de CO<sub>2</sub> formés sur le plat est trop faible pour devoir considérer un écoulement entre les mailles de la grille.