Étude des conditions du CO_2 à l'état liquide à la surface d'une planète

Lundi 30 Juin 2025

Killian MATHEY

Directeurs de stages :

Franck Selsis
Jérémy Leconte

Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux

Université de Bordeaux

Sommaire:

- Présentation, contexte, objectifs
- Approche de la méthode climatique inversé
- Calcul autocohérent des profils thermiques
- Comparaison des deux méthodes
- Conclusion / Bilan

Présentation, contexte, objectifs

Atmosphères d'H_2O → atmosphère de pur CO_2

- Gaz à effet de serre

- Présent dans de nombreuses atmosphères planétaires

- Rôle clé dans les climats planétaires (cycles atmosphériques, stabilité thermique globale)

Possible conditions d'un océan de dioxyde de carbone à la surface d'une planète (flux stellaire, distance)

Y'a-t-il un phénomène d'emballement de l'effet de serre comme pour H_2O (*runaway greenhouse)*

≠ des 2 méthodes

Approche de la méthode climatique inversé

Construction de profils T_{surf} et P_{surf} fixés

Structure thermique entièrement convective $\frac{dlnT}{dlnP} = \frac{R}{Cp}$

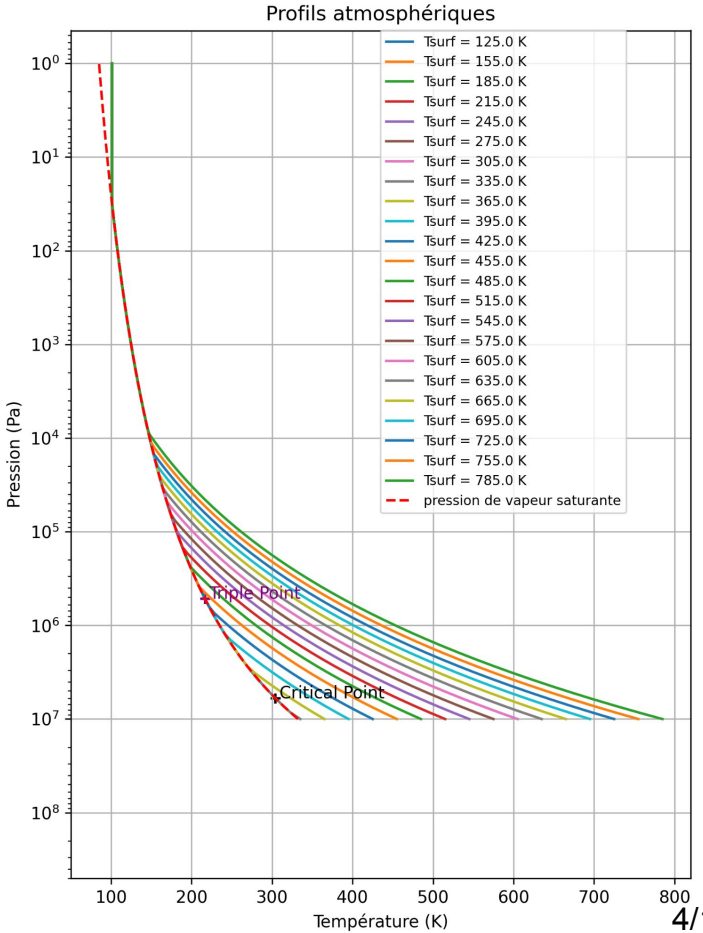
T_{surf} < 310 K

- Profil thermique suit $P_{sat}(T)$
- Convection humide → CO_2 sous forme condensée
- Fin zone convective → stratosphère isotherme (ne participe pas au bilan radiatif)

T_{surf} > 310 K

- Gradient adiabatique → convection sèche
- Courbe de saturation (s-g) (l-g)
- Stratosphère isotherme

OLR Albédo Insolation permettant l'équilibre



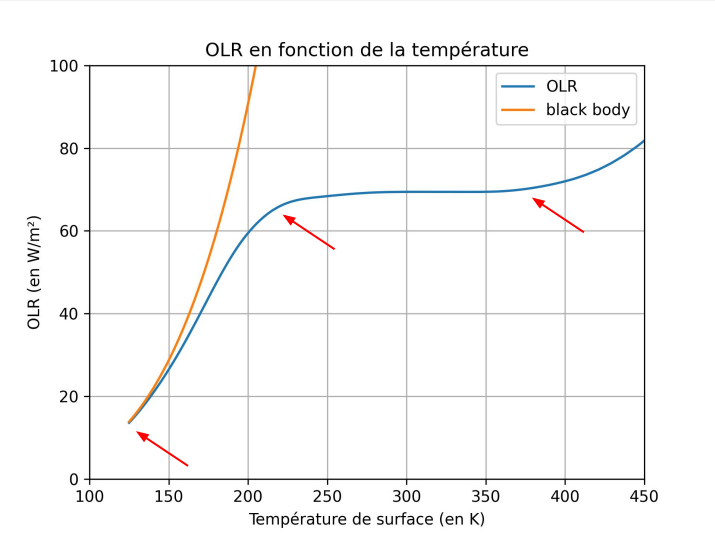
Approche de la méthode climatique inversé

Albédo: Capacité d'un corps à réfléchir la lumière reçue

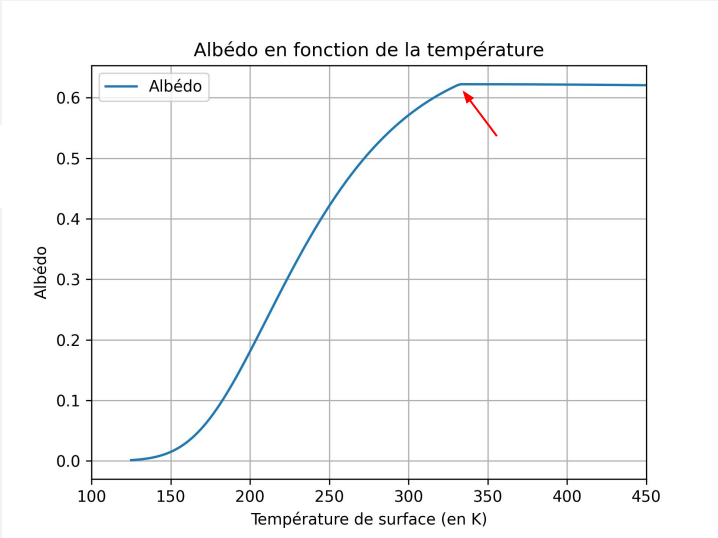
T ↗→ densité atmosphérique ↗

Pression maximale de CO2

OLR : Flux émis par la surface et l'atmosphère



$$Albedo = \frac{OSR}{f_i}$$



Émission → toute l'atmosphère depuis sa surface

Émission → au-dessus d'une zone opaque au rayonnement thermique

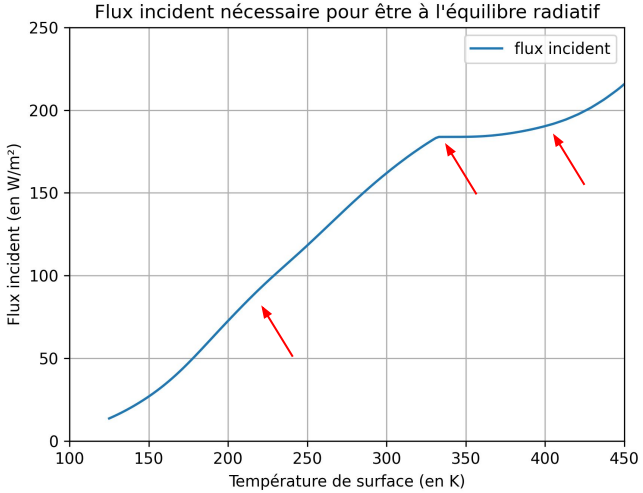
Instabilité et emballement thermique

Atmosphère saturée

Approche de la méthode climatique inversé

Flux incident

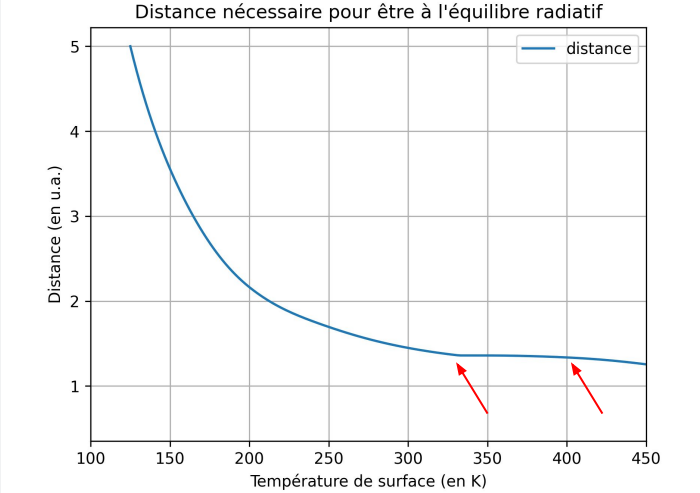
Équilibre radiatif → ASR = OLR



$$f_i = \frac{OLR}{1 - Albedo}$$

$$d\ (\text{en u.a.}) = \sqrt{\frac{340}{f_i}}$$

Distance planète - Soleil à l'équilibre



f_i ↗ → plateau (albédo ↗ !) → f_i ↗

T ↗→ distance à l'étoile ↙ → plateau

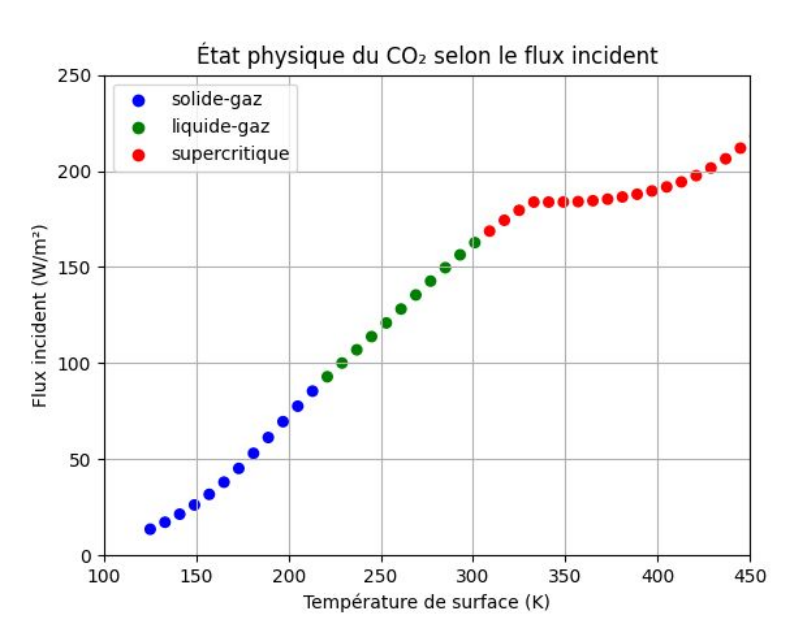
Approche de la méthode climatique inversé

Diagramme de phase du CO2

Point triple

Point critique

Solide-gaz → 217 K → Liquide-gaz → 304 K → Supercritique

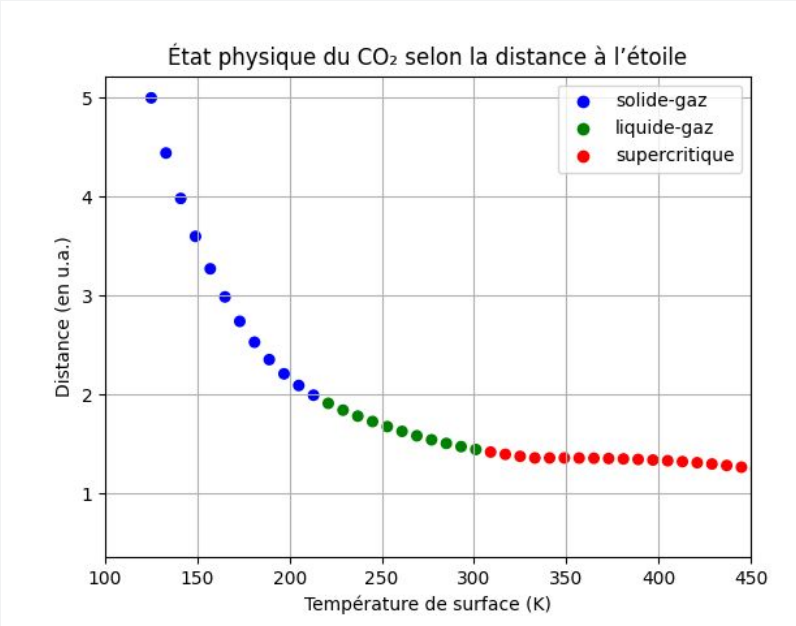


Liquide-gaz

90 - 165 W/m²

1.44 - 1.94 u.a.

Mars: 1.52 u.a.



Calcul autocohérent des profils thermiques

Libraire ***exo-k*** → équilibre radiatif de toute une atmosphère

- Convection sèche et humide

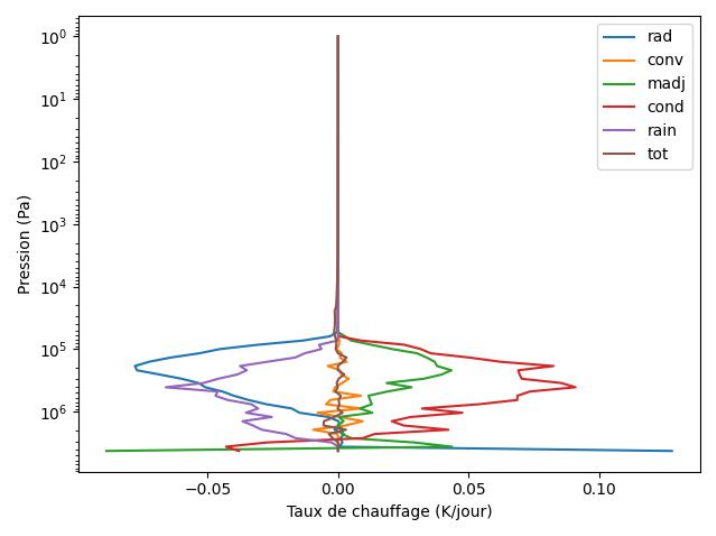
- Pluie - Diffusion - Rayonnement

Mélange et redistribution constante de l'atmosphère

Saturation →Condensation →Réévaporation

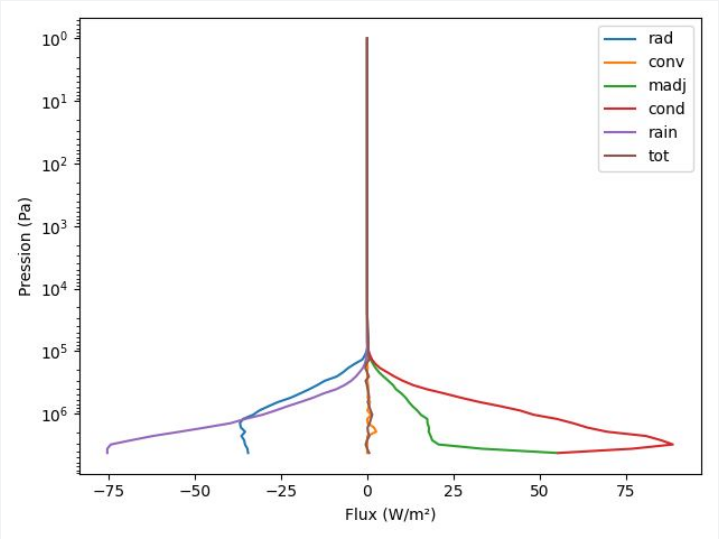
Réservoir de surface

Pas de T_{surf} → Flux net total nul



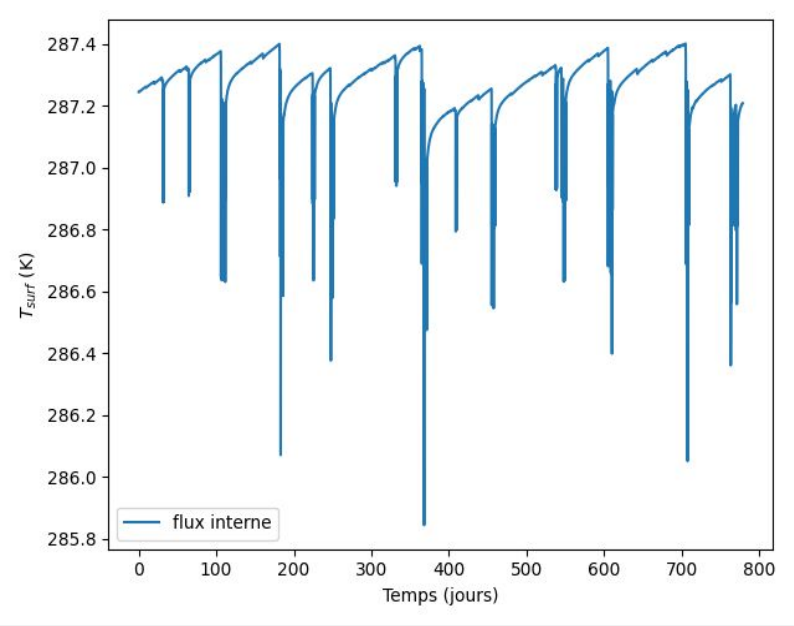
Profil → équilibre → augmentation du flux incident → équilibre

Profil équilibré: flux et taux de chauffage totaux sont nuls



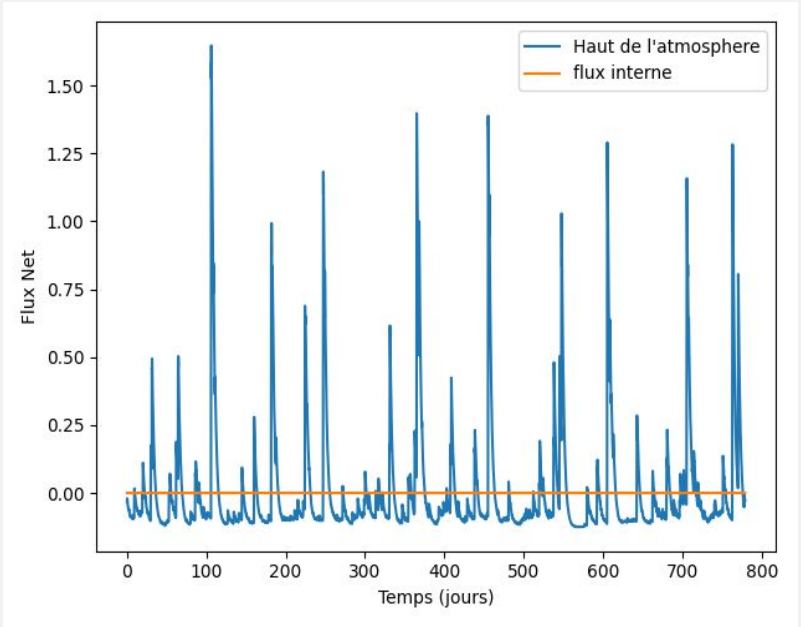
Calcul autocohérent des profils thermiques

Équilibre numérique mais physique Atmosphères non-statiques Pluie Évaporation



Température initiale: 298 K

Flux incident: 160 W/m²



Calcul autocohérent des profils thermiques

Profils atmosphériques radiatifs-convectifs équilibrées

Courbe de saturation
- Point triple
- Point critique

Flux incident

État du CO_2 en surface

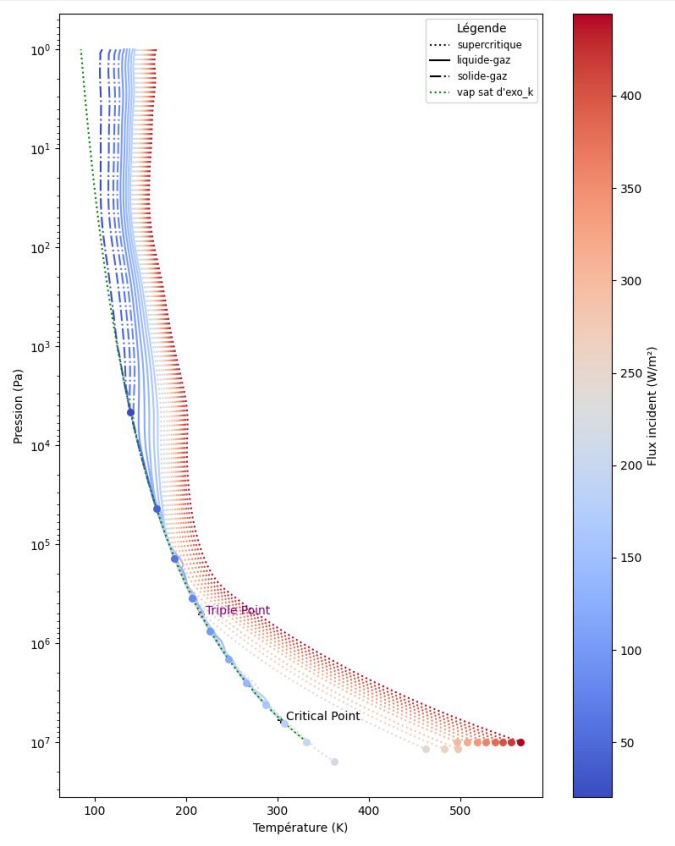
Principal transfert d'énergie

Bonne hypothèse de base

Liquide-gaz

90 - 180 W/m² 1.37 - 1.94 u.a.

90 - 165 W/m² 1.44 - 1.94 u.a. ← Avant



Comparaison des deux méthodes

Comparaison de deux profils possédant le même flux incident

Liquide en surface

T et P de surface plus basse T et P en altitude plus grande

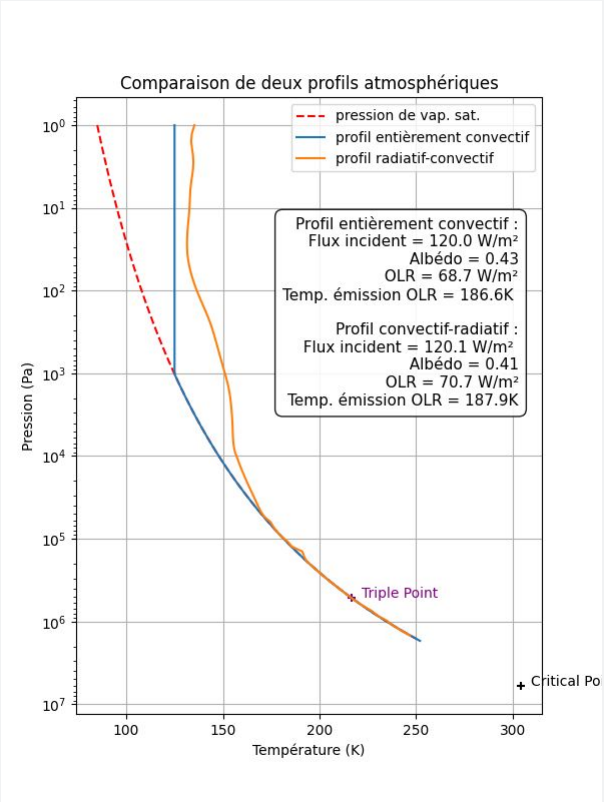
Même bilan radiatif

$$f_i \times \text{Albédo} + \text{OLR} = 120.3$$

$$f_i \times \text{Albédo} + \text{OLR} = 119.8$$

$$T = \left(\frac{OLR}{\sigma}\right)^{\frac{1}{4}}$$

Atmosphère entièrement convective → bonne approximation



Comparaison des deux méthodes

Flux incident

Même allure

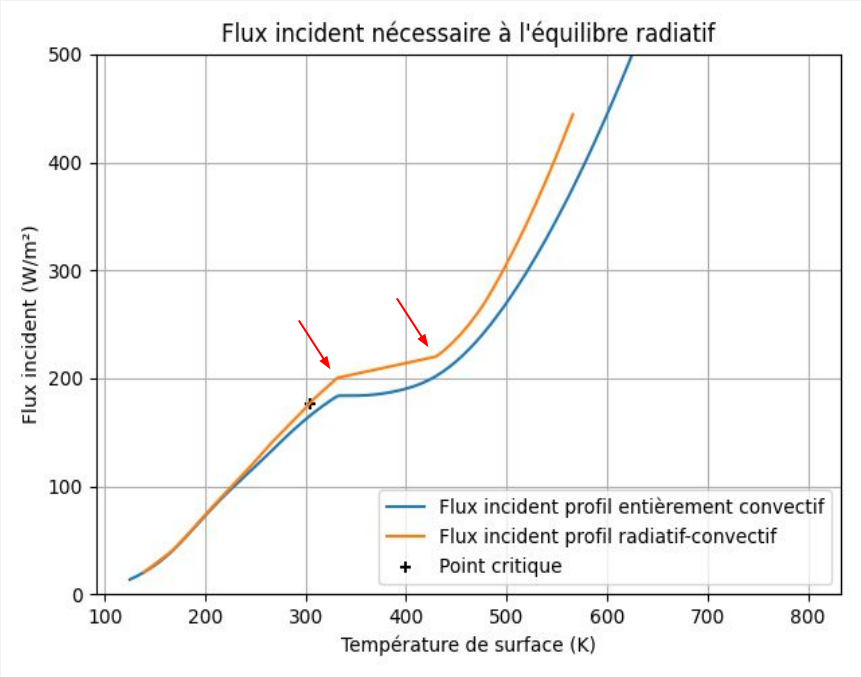
Pente du runaway moins raide

Faible phénomène d'emballement thermique

Température de surface > que le point critique

Pas d'impact pour les conditions du CO_2 liquide

≠ avec l'H_2O

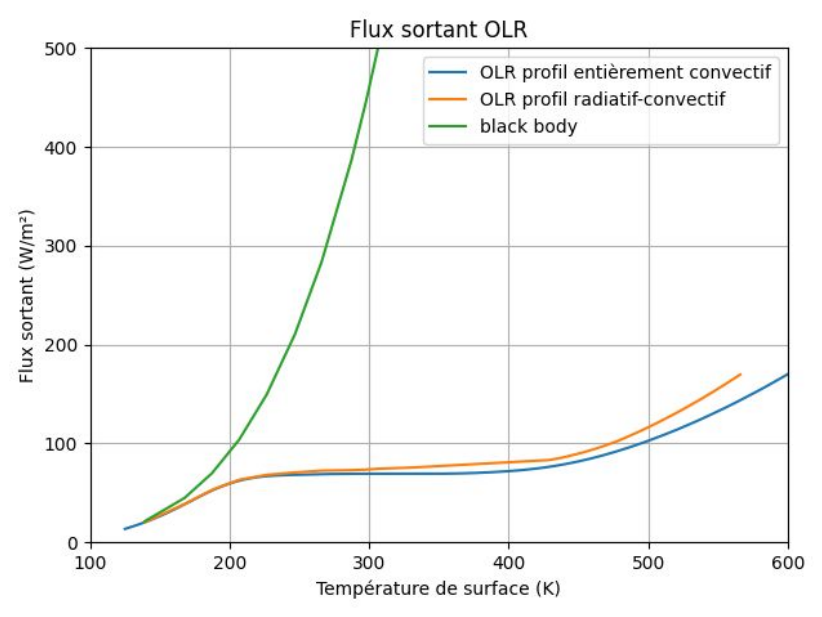


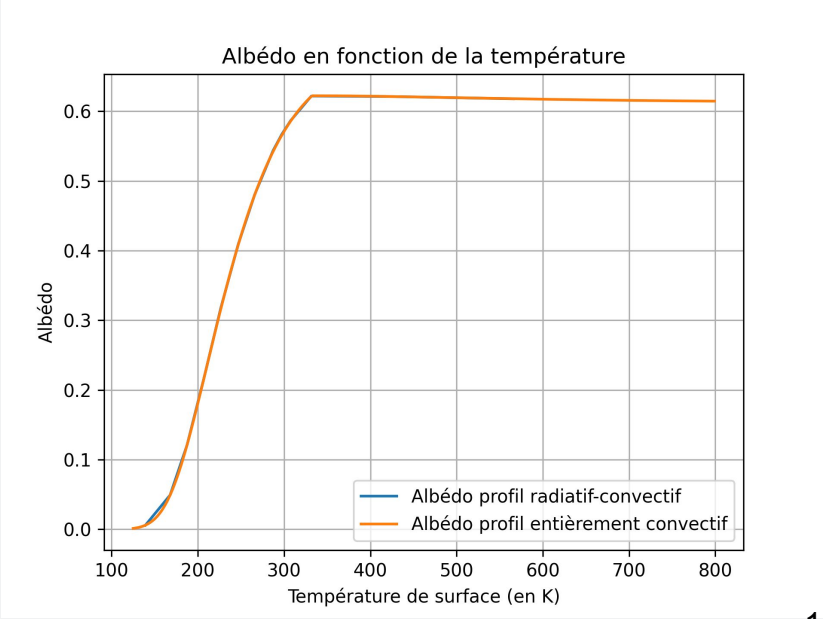
Comparaison des deux méthodes

Flux OLR → même allure Plateau - marquée

Stabilité pour les conditions du CO_2 liquide

Albédo: Même allure et valeur





Conclusion / Bilan

Méthode climatique inversé → profils atmosphériques purement convectifs et flux associés

Libraire ***exo-k*** → équilibre →profils radiatifs-convectifs

Océan de CO_2 liquide stable en surface

Plage de flux stellaires: 90 - 180 W/m²

Plage de distance à l'étoile: 1.37 - 1.94 u.a.

Peu d'écarts entre les deux méthodes

Runaway moins marqué et plus tard

Résolution d'un bug de la libraire ***exo-k*** pour une atmosphère constituée d'une seule molécule

Autonomie Utilisation d'exo-k

Processus climatiques planétaires Profils atmosphériques

Différents flux échangés et bilans énergétiques associés

Autres types d'étoiles (Trappist-1)

Ajout d'un flux géothermique interne

Rayon planétaire Gravité

Merci de votre
attention !