

Atmosphères soufflées, atmosphères soufflantes, atmosphères vivantes

G. Gronoff (SSAI, NASA LaRC, USA)



NASA Nexus for Exoplanet System Science, grant NNX15AE05G.

Je tiens à remercier tous mes collègues, aux US, en Europe et ailleurs, qui m'ont aidé à faire ces travaux. Rien n'aurait été possible sans eux. Les erreurs et imprécisions sont bien entendu entièrement ma faute.

Qui suis-je?

Éducation

- 2006: Diplôme d'ingénieur ENSPG (maintenant PHELMA) 2006 (après class prépa Champollion)
- 2006: Master astrophysique UJF
- 2009: Doctorat "Études des entrées énergétiques dans les atmosphères de Mars, Vénus et Titan" sous la direction de J. Lilensten

Travail pour et à la NASA

- 2009: Post-doctorat à NASA Langley Research Center
- 2012: embauché dans une entreprise sous-traitante de LaRC
- Nombreux projets: Lidar atmosphérique (comprendre la pollution), irradiation des astronautes et du personnel navigant sur les avions de ligne, astrobiologie (le sujet du jour!)

Faire comme moi?

Il y a plein d'options!

Motivation

Pourquoi étudier les atmosphères planétaires

- La vie sur Terre est fortement liée à la présence d'une atmosphère
- Apparition de la vie: nécessite une atmosphère?
- Observation de la vie sur d'autres planètes: in-situ (peu de chances); détection dans les atmosphères exoplanétaires (beaucoup plus de chances!)

L'habitabilité d'une planète, qu'est-ce que ça veut dire?

- ① On peut y aller en week-end (enfin on conseille de prendre en compte le temps de voyage)?
- ② Il y a de l'eau liquide (par contre il peut faire 90 degrés)?
- ③ Il y a de la vie (team Aliens)?
- ④ On peut la coloniser (team Interstellar)?

Motivation

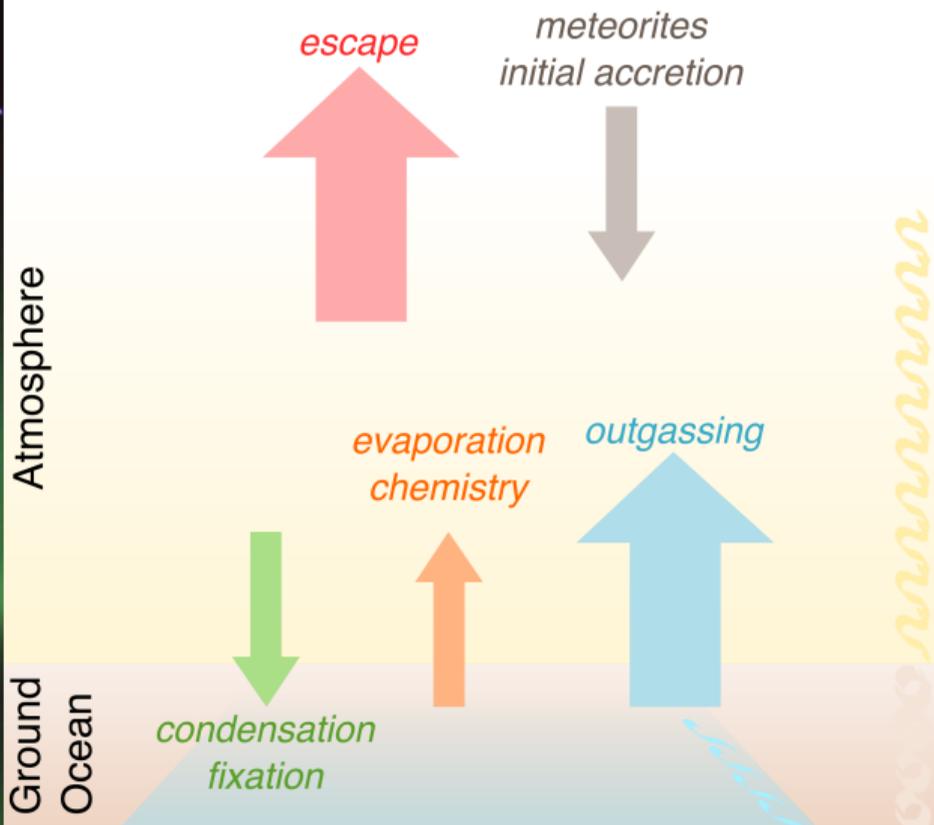
L'habitabilité d'une planète, qu'est-ce que ça veut dire?

- ① On peut y aller en week-end (enfin on conseille de prendre en compte le temps de voyage)?
- ② **Il y a de l'eau liquide (par contre il peut faire 90 degrés)?**
- ③ Il y a de la vie (team Aliens)?
- ④ On peut la coloniser (team Interstellar)?

Réponse 2!!! Enfin dans la communauté scientifique

- Peut-on détecter des exoplanètes habitables?
- Il y a-t-il eu d'autres planètes habitables dans le système solaire?
- Si les atmosphères ne sont pas habitables, pourquoi? Il y aurait-il des phénomènes intéressants que l'on n'observe pas dans le système solaire?

Faire et garder une atmosphère



Faire et garder une atmosphère

On va étudier en détails l'échappement!

Et c'est probablement plus complexe que vous ne l'imaginez!

Les hautes atmosphères planétaires et l'échappement

Qu'est-ce que la haute atmosphère?

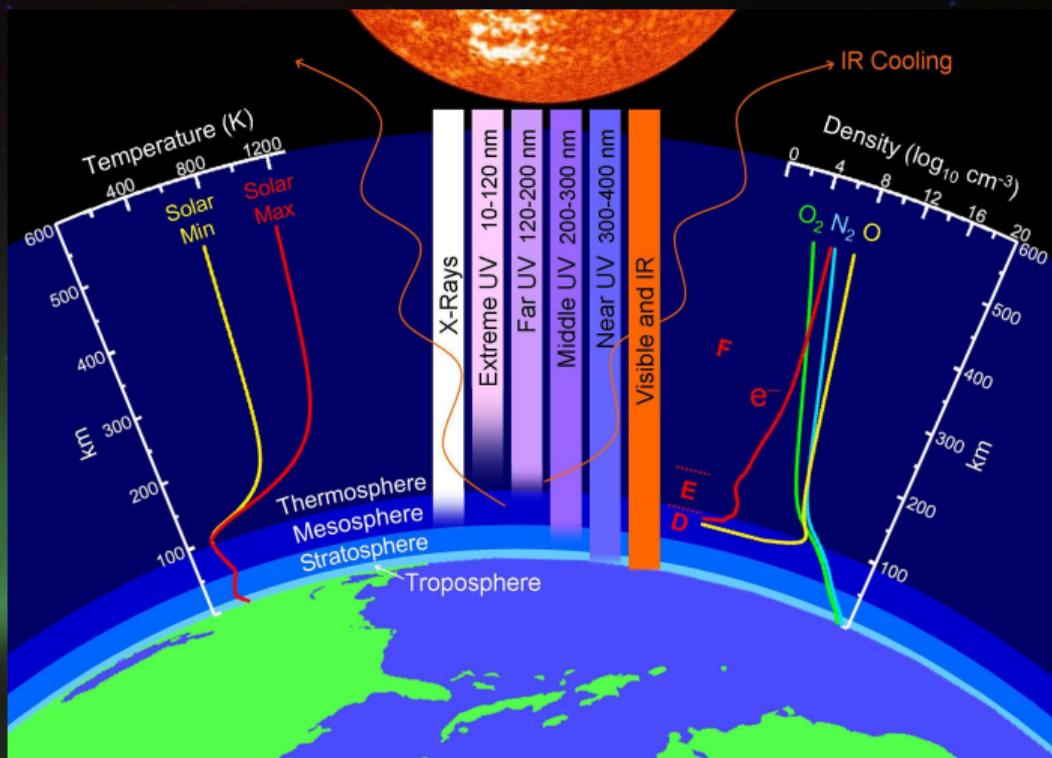
- Thermosphere et ionosphere
- Sur Terre, la limite de l'espace est de 100 km. C'est aussi le début de la haute atmosphère!
- Les aurores boréales et australes ont lien dans la haute atmosphère! (généralement 120-250 km).

Les hautes atmosphères planétaires et l'échappement

Quels sont les paramètres qui influencent les hautes atmosphères?

- Composition atmosphérique!
- Rayonnement EUV-XUV Solaire (ionization, dissociation)
- Particules (electrons, protons,...)
- Champs (magnétique, électrique) et leurs conséquences (transport d'ions, chauffage joule. . .). Ne pas oublier le champ interplanétaire!
- Chimie (modifie la composition et la température)
- Processus radiatifs (CO_2 $15\mu\text{m}$; NO , ...)
- Diffusion, conduction, vents...

Les hautes atmosphères planétaires et l'échappement



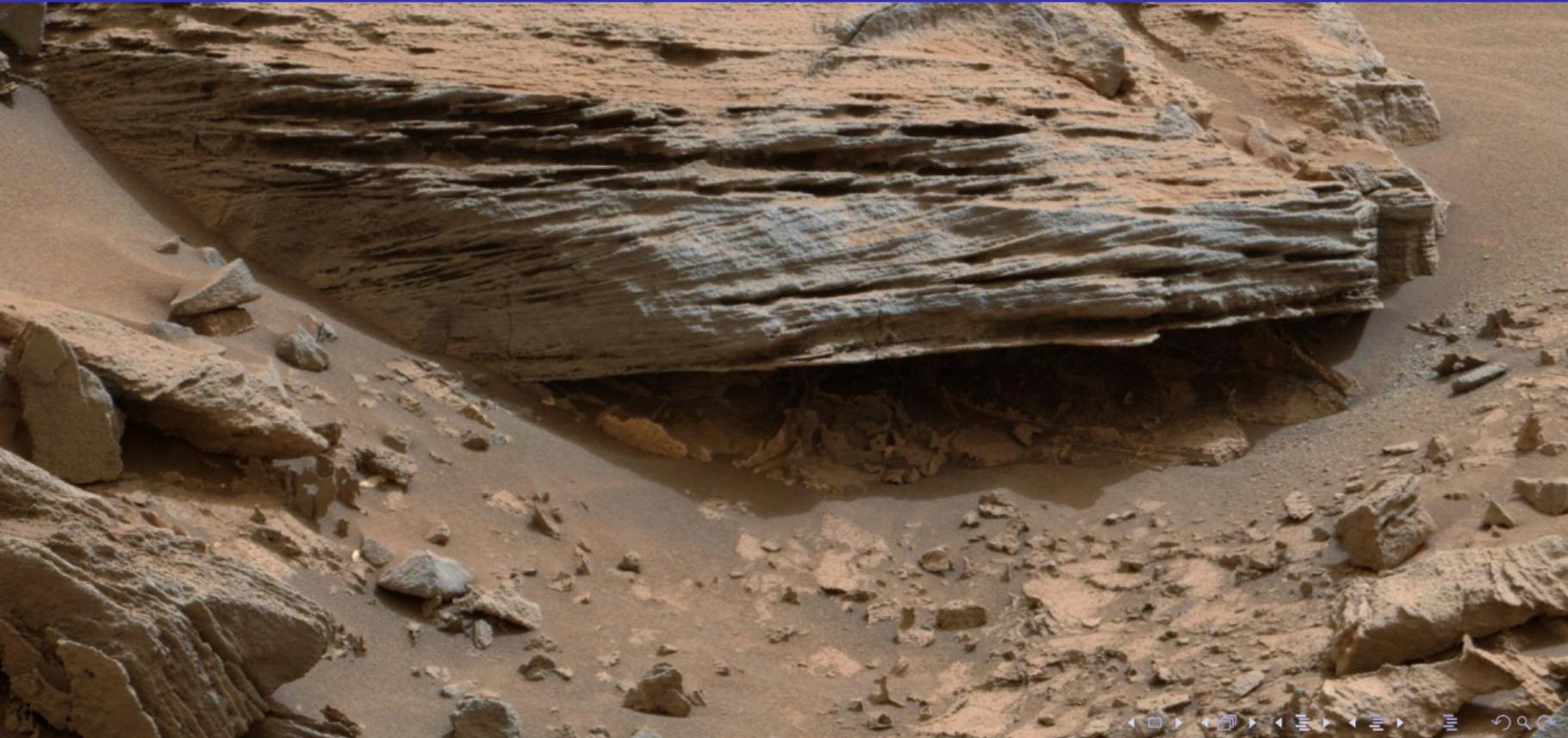
Credit: John Emmert/Naval Research Lab/nasa.gov

Les hautes atmosphères planétaires et l'échappement

Comment étudie-t-on les hautes atmosphères?

- Modèles
 - 1-D (photochemical)
 - 3-D (Global Circulation Models)
 - Modèles de radiation et de vent solaire
 - Modèles de transport des particules énergétiques
- Expériences de laboratoire
- Observations par satellite (e.g. SABER, Mars Express, Venus Express, MAVEN...)

Petite question!



Petite question!

Mars et l'échappement atmosphérique

Image NASA MSL, Curiosity. Preuve de la présence d'une rivière
Ce n'est possible que parce que Mars avait une atmosphère très dense par le passé

L'échappement de Mars à l'heure actuelle est-il?

- ① Un pot d'échappement?
- ② 25x l'échappement de la Terre, car la Terre est protégée par son champ magnétique!
- ③ Sensiblement la même que sur Terre!
- ④ Très dangereuse pour les satellites, on en a perdu pas mal!

Petite question!

Mars et l'échappement atmosphérique

Image NASA MSL, Curiosity. Preuve de la présence d'une rivière

Ce n'est possible que parce que Mars avait une atmosphère très dense par le passé

L'échappement de l'atmosphère de Mars à l'heure actuelle est-elle?

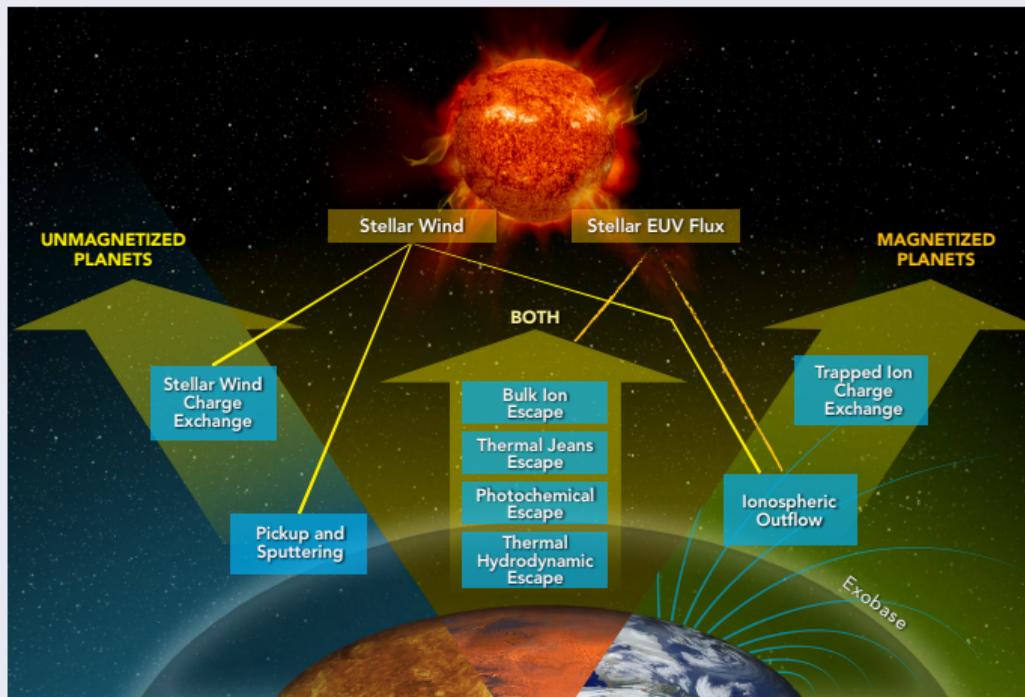
- ① Un pot d'échappement?
- ② 25x l'échappement de la Terre, car la Terre est protégée par son champ magnétique!
- ③ **Sensiblement la même que sur Terre!!!**
- ④ Très dangereuse pour les satellites, on en a perdu pas mal!

Réponse 3: mesuré par des satellites autour de Mars et de la Terre!

Si je ne vous ai pas eu, vous êtes des cracks! Le pourquoi va prendre un peu de temps!

L'échappement atmosphérique

Les différents processus d'échappement atmosphérique



Échappement thermique

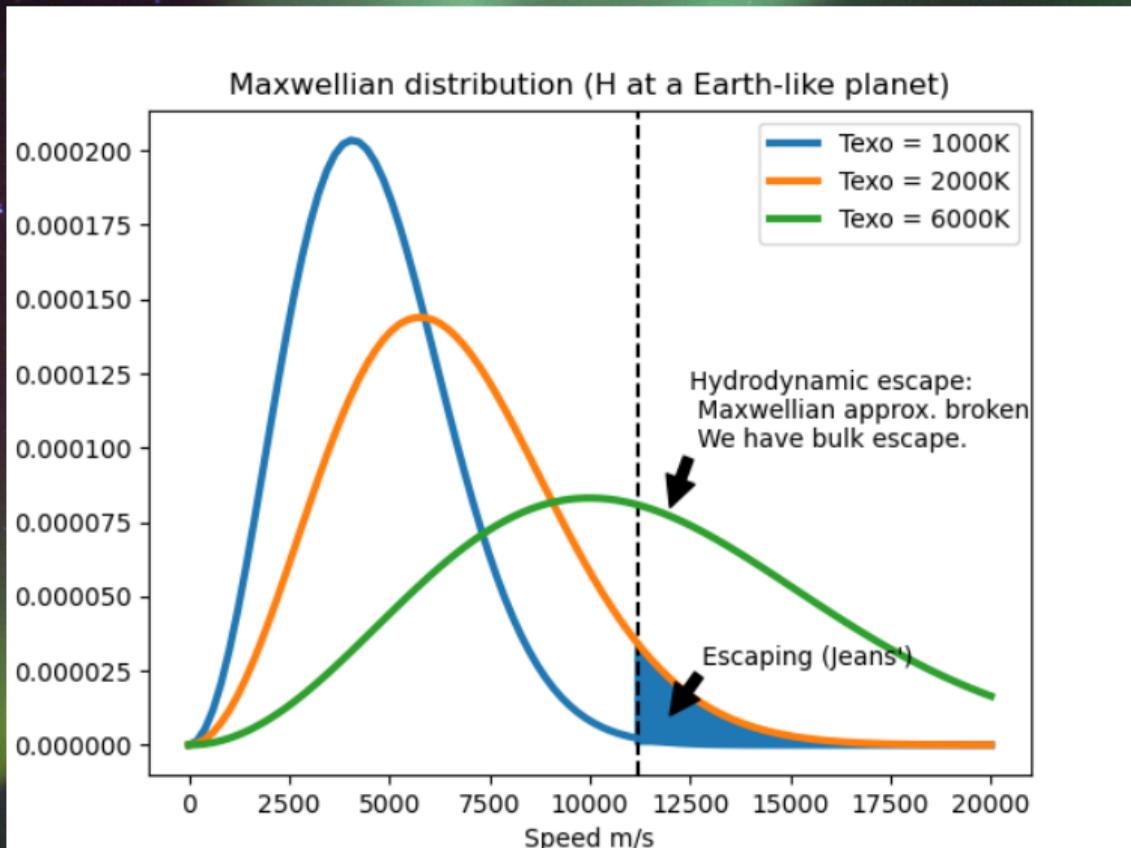
Échappement lent (de Jeans)



Échappement rapide (hydrodynamique)



Échappement thermique



Échappement thermique

Caractéristiques

- L'énergie thermique fait que les particules s'échappent
- Elle provient principalement du flux UV (extreme) solaire
- Régimes rapides et lents (Jeans/hydrodynamique)
- Toutes les planètes ont de l'échappement thermique.
- H s'échappe principalement au travers du mécanisme de Jeans lorsque l'activité solaire est élevée
- On observe des exoplanètes en échappement hydrodynamique
- L'échappement hydrodynamique a été important lors des premiers ages du système solaire!

Échappement thermique



Exoplanète Osiris, NASA animation



Les processus non-thermiques

(Exemple) Aspiré par le vent solaire!



Les processus non-thermiques

Qu'est-ce qu'un processus non-thermique?

- Processus suprathermique: on ne peut pas faire de Maxwellienne
- Exemple: Les lignes du spectre EUV-XUV solaire
- Exemple: les électrons à l'origine des aurores
- Les processus discrets (e.g. réaction chimique) qui donnent aux atomes des énergies au dessus de la vitesse d'échappement quelque soit la température

Sources of non-thermal escape?

- Photochimie. (Recombinaisons, dissociations...)
- Accélération des ions dans des champs électriques
- Échange de charge
- Processus de sputtering (billard)

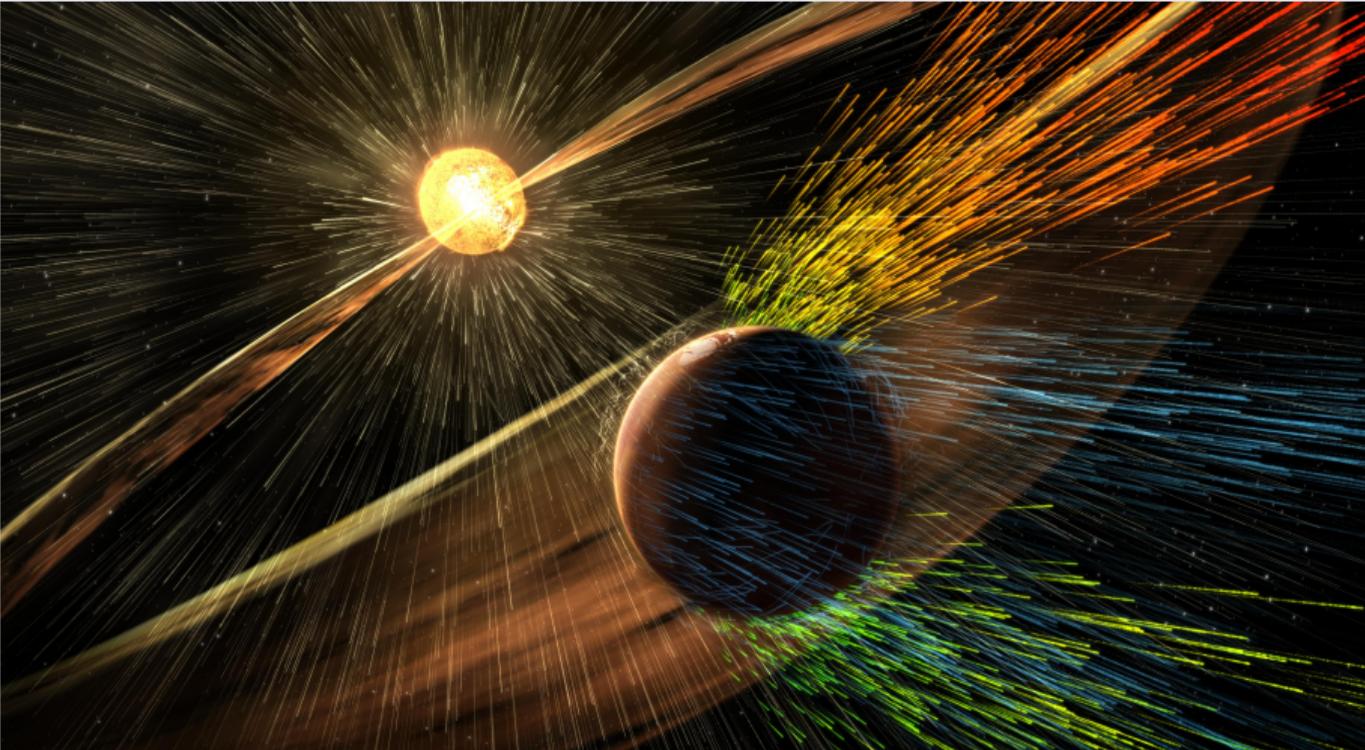
Échappement Photochimique

Échappement Photochimique

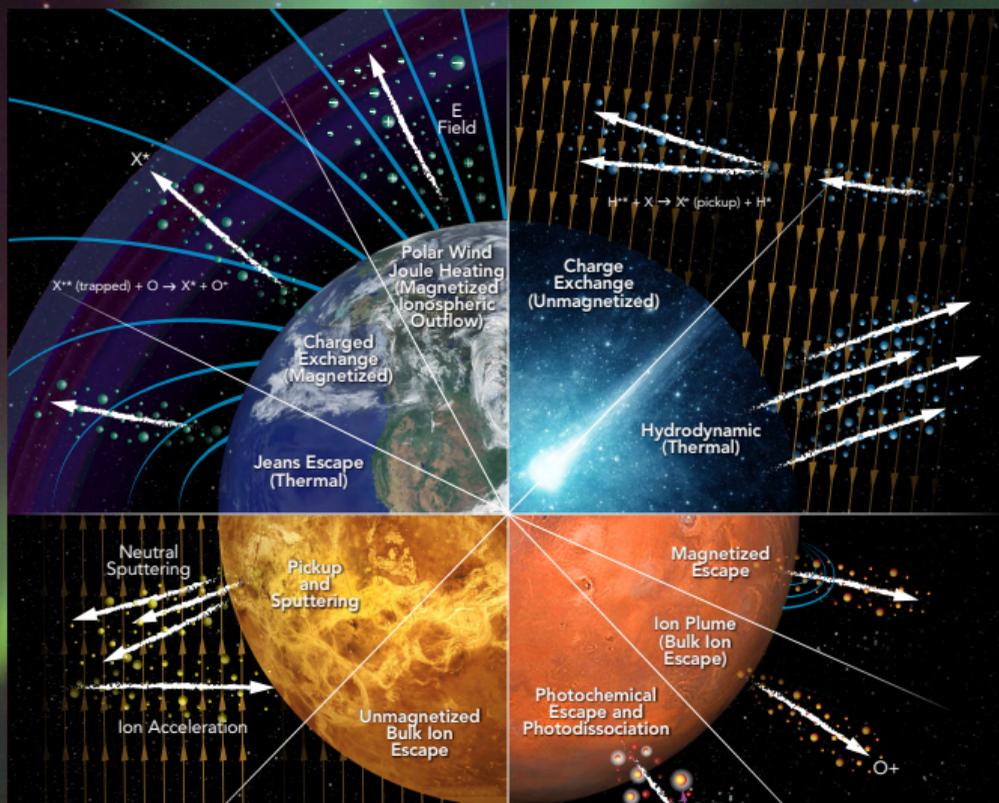
- Photodissociations, dissociation par impact d'électron
- e.g. $\text{CO}_2 + h\nu \rightarrow \text{CO} + \text{O}^*$
- Recombinaison d'ions
- $\text{O}_2^+ + e \rightarrow 2\text{O}^*$
- Major non-thermal escape process at Mars. (Main source of O loss)

Échappement d'ions

Pour les planètes non-magnétisées



Résumé: il y a beaucoup de processus!



Gronoff, G

Atmosphères soufflées, atmosphères soufflantes, atmosphères vivantes

Résumé: il y a beaucoup de processus!

Points intéressants

- La Terre perd 50 000T d'hydrogène par an (1.5kg/s) par Jeans ou échange de charge
- Elle perd 25 000T d'oxygène par an (0.75kg/s)
- Mars perd la même quantité d'hydrogène par échappement de Jeans et d'oxygène par recombinaison de O_2^+
- Vénus perd moins d'hydrogène, 3000T par échange de charge, et perd son Oxygène 50 000T, par échappement ionique et photochimique

Sur le rôle de l'activité Stellaire



CME



Sur le rôle de l'activité Stellaire

Activité stellaire et évolution des atmosphères

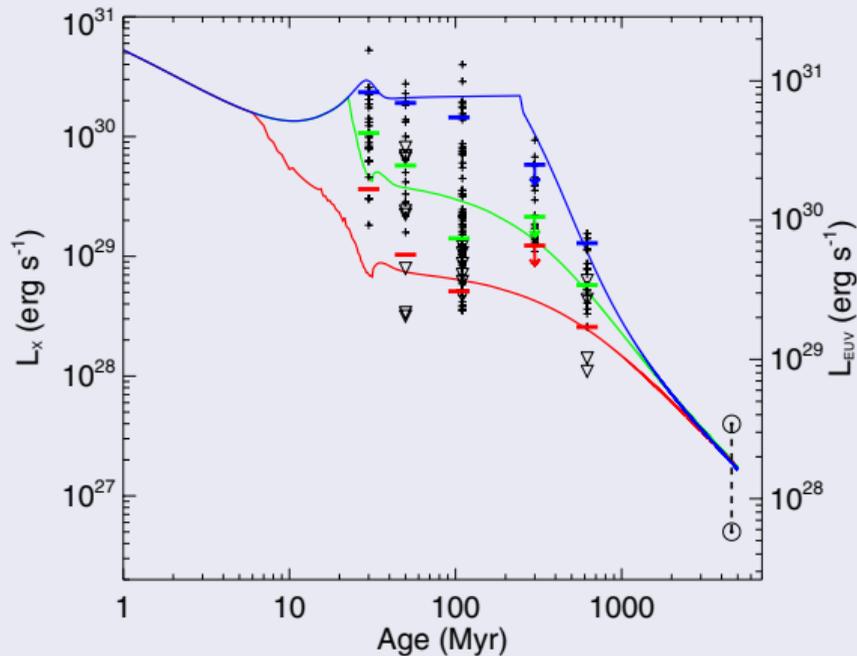
- Flares
- Éjection de mass coronale
- SEP évènements de particules stellaires
- Rotation et activité

Effets sur les atmosphères

- Flares: chauffage et ionisation (thermique + non-thermique)
- Éjection de mass coronale: augmentation du vent stellaire (non-thermique)
- SEPs: effets sur l'atmosphère basse

Sur le rôle de l'activité Stellaire

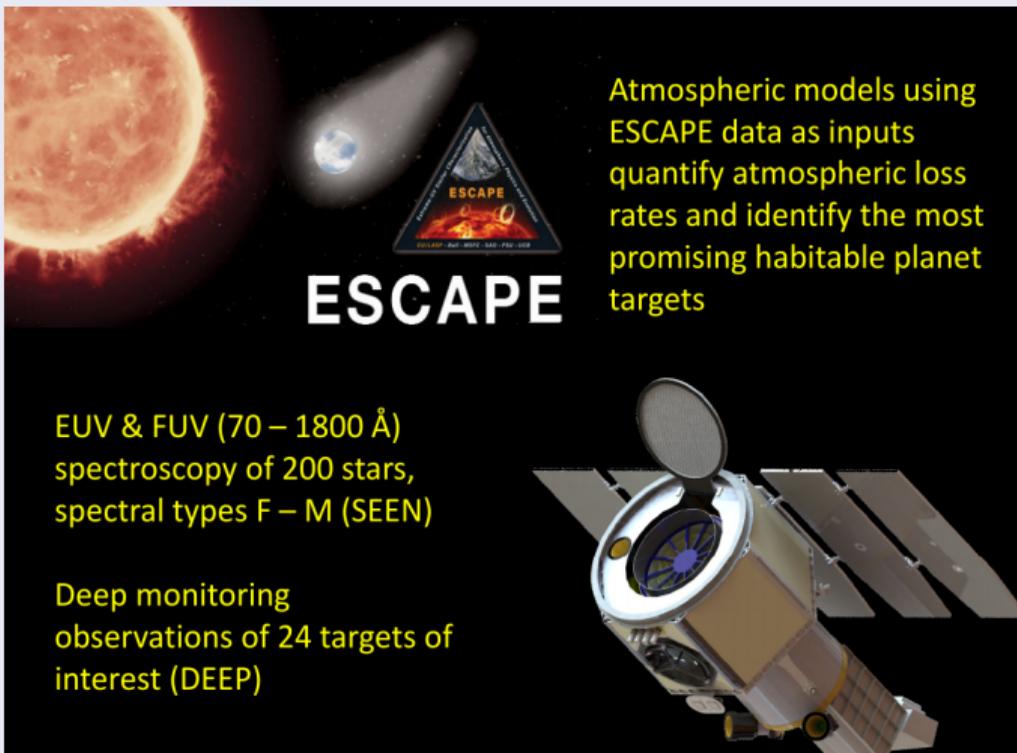
Évolution de l'activité Solaire



From Gronoff et al. 2020 after Tu et al. (2015). (The extreme ultraviolet and X-ray Sun in time: High-energy evolutionary tracks of a solar-like star. Astronomy et Astrophysics)

Sur le rôle de l'activité Stellaire

ESCAPE! PI: K. France. Aurons-nous la chance de l'envoyer?

The poster features a large orange star on the left, a small Earth with a comet streak in the upper center, and a satellite with solar panels on the right. A triangular logo with 'ESCAPE' and 'COLLABORATION: CNRS - CNES - CNRS - CNRS - CNRS' is in the center. The word 'ESCAPE' is written in large white letters below the logo.

Atmospheric models using ESCAPE data as inputs quantify atmospheric loss rates and identify the most promising habitable planet targets

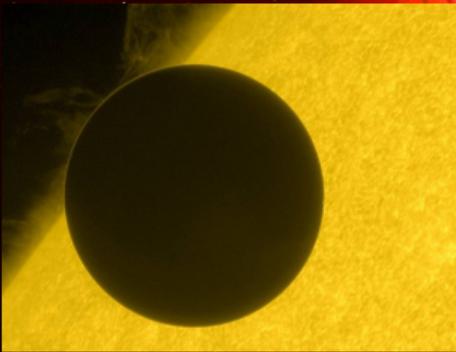
EUV & FUV (70 – 1800 Å) spectroscopy of 200 stars, spectral types F – M (SEEN)

Deep monitoring observations of 24 targets of interest (DEEP)

Quid du champ magnétique?

Le magnétisme et les planètes du système solaire

- Terre: champ B, atmosphère
- Mercure: champ B, pas d'atmosphère
- Mars: restes de B, faible atmosphère
- Vénus: pas de B, atmosphère massive

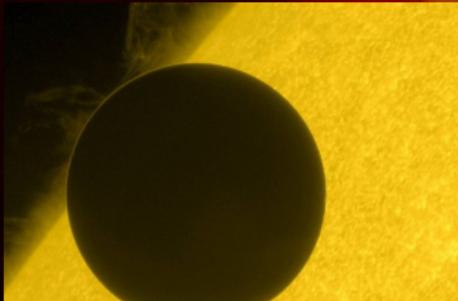


Credit: NASA/JAXA/Hinode

Quid du champ magnétique?

Mesures d'échappement

- Terre, Mars et Venus: échappement similaire!
- L'échappement au dessus du champ magnétique crustal de Mars est légèrement augmenté ou réduit en fonction des conditions (observations MAVEN)
- Le champ B de la Terre empêche l'échappement aux basses latitudes, mais l'augmente considérablement aux hautes latitudes
- L'échappement polaire est plus forte avec l'activité solaire
- On n'a pas de preuve d'échappement plus fort lors de l'inversion du champ magnétique Terrestre (rien de bien terrible non plus au niveau de l'augmentation des irradiations)



Quid du champ magnétique?

Échappement et champ magnétique, résumé

- Il n'y a pas d'argument décisif pour dire que le champ magnétique augmente ou réduit l'échappement atmosphérique
- Il augmente certains processus mais en réduit d'autres
- La question est peut-être mal posée
- Une meilleure question: pour une activité stellaire donnée et une atmosphère donnée, comment varie l'échappement en fonction du champ magnétique?

Échappement magnétique

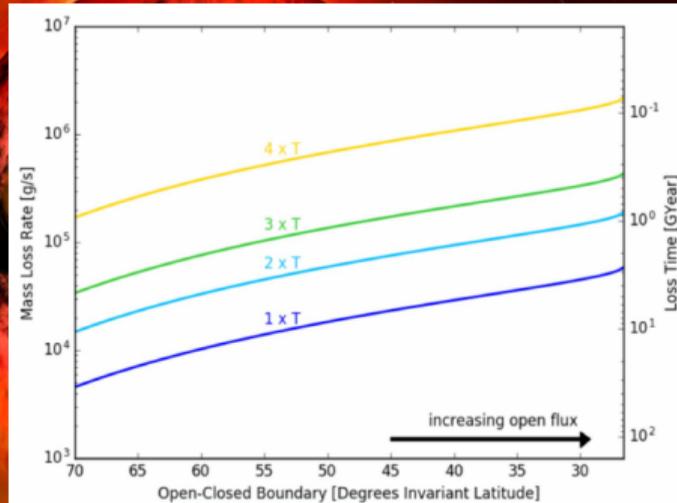
Appliquons ces connaissances au cas de Proxima b
Garcia-Sage et al. 2017

Le cas de la “protection” magnétique de Proxima Centauri b

Que se passerait-il si on inversait Proxima Centauri b et la Terre?

- Simulation du vent polaire (Polar Wind Outflow Model – Glozer et al.)
- Notre Terre, échangée avec Proxima b
- On fait quelques hypothèses sur la température exosphérique

Le cas de la “protection” magnétique de Proxima Centauri b



Il n'y a pas de protection par le champ magnétique!

Cette notion ne fonctionne que pour certains processus d'échappement (et pour l'orbite basse terrestre).

Une meilleure question serait “Quels processus sont les plus importants en fonction des paramètres stellaires et planétaires?”

Le Télescope Spatial James Webb: bientôt lancé depuis Kourou!



Le JWST, NASA animation



Le Télescope Spatial James Webb: bientôt lancé depuis Kourou!

Est-ce que le JWST va détecter des atmosphères habitables

- Il devra se concentrer sur les naines Rouges (M)
- Naines rouges qui ont un échappement atmosphérique extrême
- On ne sait pas si il est possible d'avoir du dégazage assez important pour compenser
- On a observé, autout des M, des planètes rocheuses qui se sont avérées des noyaux de planètes géantes

Le Télescope Spatial James Webb: bientôt lancé depuis Kourou!

Est-ce que le JWST va détecter de la vie sur d'autres planètes? QUESTION

- ① On en sait rien!
- ② J'en doute fortement
- ③ Il faut mieux comprendre comment la vie s'est formée

Conclusions

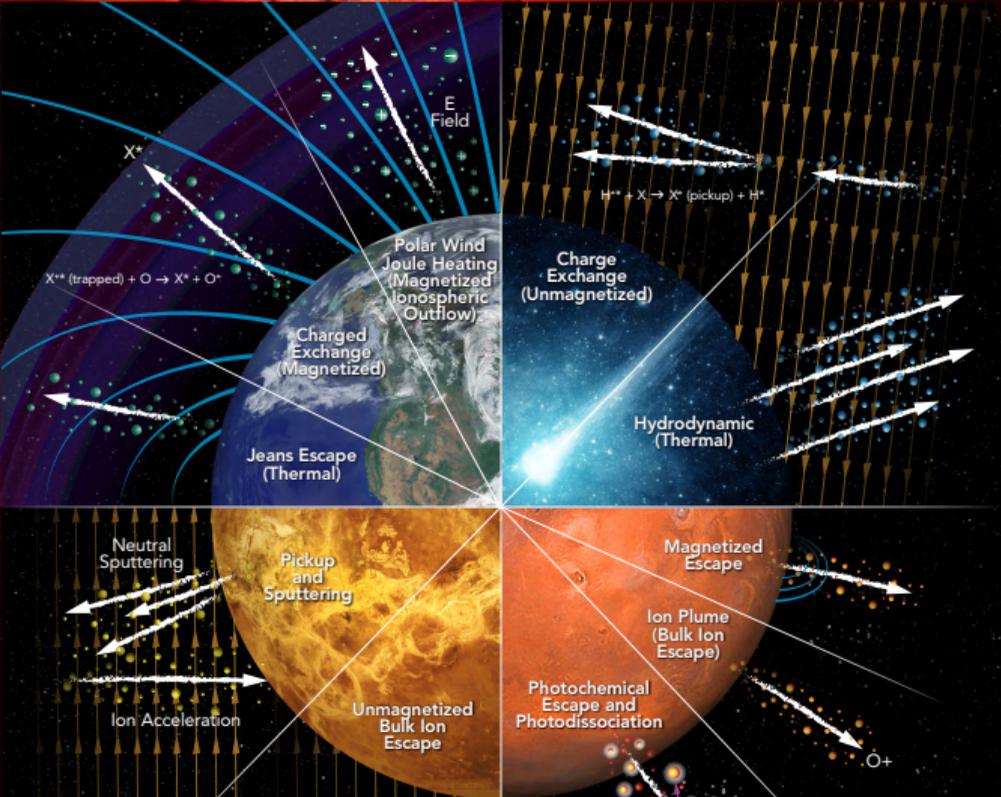
Conclusions

- Étudier l'échappement est essentiel pour comprendre les atmosphères planétaires et l'apparition de la vie
- Les naines rouges ont peu de chances d'avoir des planètes avec une atmosphère qui ressemble à la notre
- Nous devons étudier les vent stellaires et les évènements énergétiques autour d'autres étoiles
- Ceci est essentiel pour savoir si une planète est habitable!

Review paper on atmosphere escape

Gronoff et al. 2020

Questions?



Gronoff, G

Atmosphères soufflées, atmosphères soufflantes, atmosphères vivantes

