



# Étude de l'atmosphère de Jupiter : chimie & dynamique

Lilian Heydel

## ► To cite this version:

| Lilian Heydel. Étude de l'atmosphère de Jupiter : chimie & dynamique. 2023. hal-04195905v3

**HAL Id:** hal-04195905

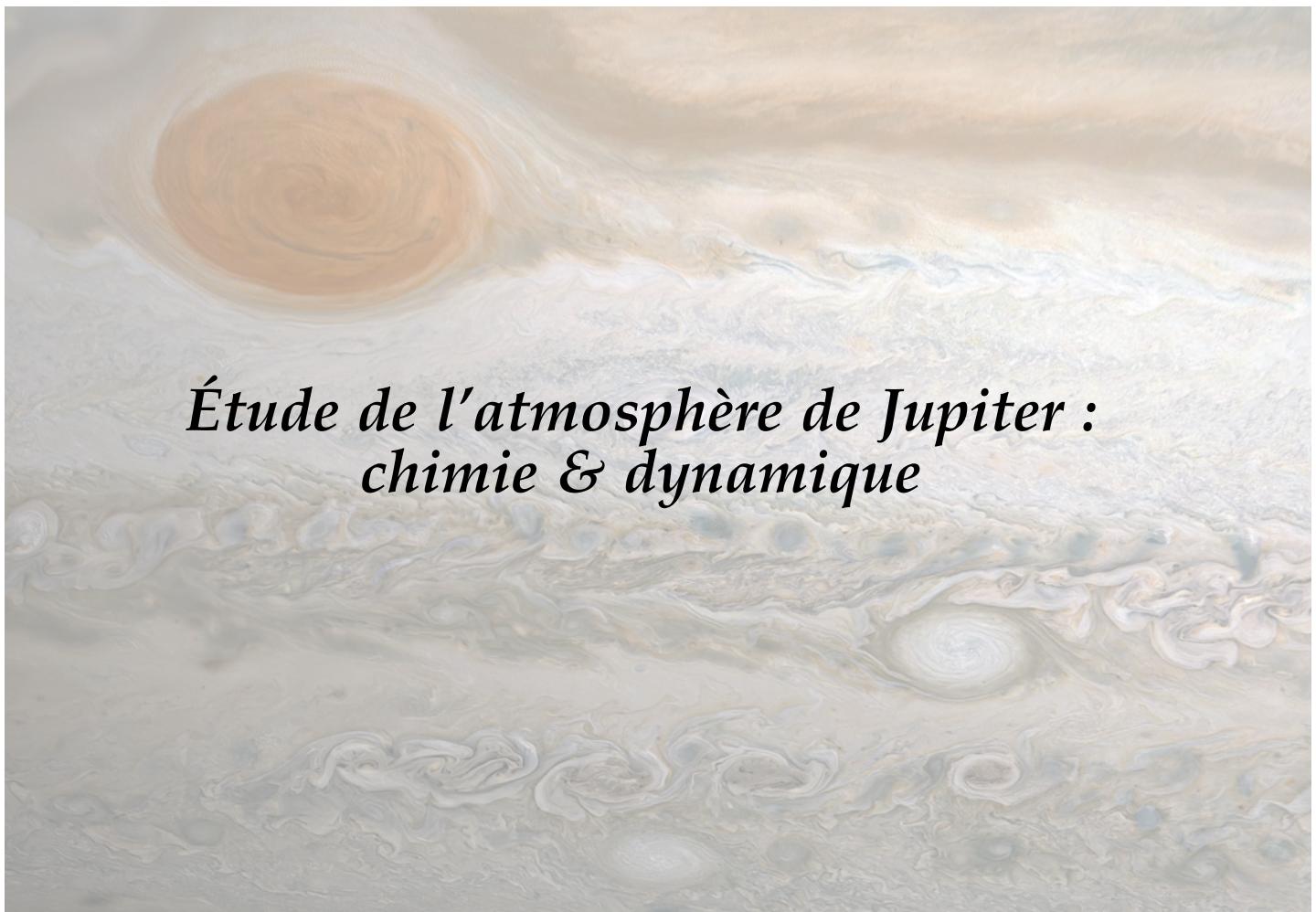
**<https://hal.science/hal-04195905v3>**

Preprint submitted on 1 Dec 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SYNTHÈSE DOCUMENTAIRE



*Étude de l'atmosphère de Jupiter :  
chimie & dynamique*

Lilian HEYDEL  
L2 Sciences de la Terre, de l'Univers  
et de l'Environnement 2022-2023

Dr. Laurent CAMBRÉSY  
Chercheur référent  
[laurent.cambresy@astro.unistra.fr](mailto:laurent.cambresy@astro.unistra.fr)



*Je tiens à remercier chaleureusement M. Cambrésy d'avoir accepté de m'accorder son temps pour ce travail de synthèse, en m'aiguillant sur la méthodologie de rédaction scientifique et sur la mise en page de mes recherches.*

*Ce travail de longue haleine, réalisé sur mon temps libre et dans une autonomie la plus totale, m'a été d'une aide remarquable quant à mon souhait d'orientation pour les années qui vont suivre ma licence, mais également pour mes capacités et compétences au travail de rédaction et de lecture scientifique.*

*Je suis convaincu de vouloir consacrer mon avenir à l'étude des planètes, qui offrent encore beaucoup de choses à voir et à découvrir.*

## Résumé

Cette synthèse documentaire se penche sur l'étude approfondie de l'atmosphère de Jupiter, en se focalisant sur sa chimie et sa dynamique. Nous débutons par une exploration de la composition atmosphérique dominée par des éléments tels que l'hydrogène, l'hélium, et d'autres molécules associées. Une attention particulière est accordée au méthane, dont le rôle significatif dans la dynamique chimique est mis en évidence, notamment à travers ses réactions de photolyse sous l'influence des rayonnements solaires et internes.

Un élément crucial de l'atmosphère jovienne est la présence de sels chimiques, principalement de l'ammoniac  $\text{NH}_3$  et de l'hydrosulfure d'ammonium  $\text{NH}_4\text{SH}$ , ainsi que dans une moindre mesure de l'eau  $\text{H}_2\text{O}$ . Cette couche atmosphérique joue un rôle majeur dans la coloration distincte des différentes zones de Jupiter ; l'ammoniac est montré comme responsable de la couleur blanchâtre des zones et le mélange avec l'acétylène  $\text{C}_2\text{H}_2$  est associé à la couleur brunâtre des zones, tandis que le  $\text{NH}_4\text{SH}$ , une fois irradié, pourrait expliquer le rouge caractéristique de la Grande Tâche Rouge.

Ensuite, une analyse détaillée de la dynamique atmosphérique est entreprise. La thermodynamique spécifique à Jupiter, couplée à sa rapide rotation planétaire  $\Omega$ , génère un environnement barotropique et géostrophique favorable à la formation de tourbillons et de puissants jets zonaux. Ces mécanismes dynamiques contribuent à la variété de phénomènes remarquables observés dans l'atmosphère jovienne tels que la très ancienne *Grande Tâche Rouge* ou la présence de groupes de cyclones distincts entourant des cyclones centraux au niveau des deux pôles.

En somme, cette synthèse documentaire offre un aperçu complet des éléments chimiques et dynamiques qui gouvernent l'atmosphère complexe de Jupiter.

## Abstract

This documentary synthesis delves into the in-depth study of Jupiter's atmosphere, focusing on its chemistry and dynamics. We begin with an exploration of the atmospheric composition dominated by elements such as hydrogen, helium, and other associated molecules. Special attention is given to methane, whose significant role in chemical dynamics is highlighted, particularly through its photolysis reactions influenced by solar and internal radiation.

A critical element of Jupiter's atmosphere is the presence of chemical compounds, primarily ammonia  $\text{NH}_3$  and ammonium hydrosulfide  $\text{NH}_4\text{SH}$ , as well as, to a lesser extent, water  $\text{H}_2\text{O}$ . This atmospheric layer plays a major role in the distinct coloring of Jupiter's various zones; ammonia is identified as responsible for the whitish color of certain regions, and the combination with acetylene  $\text{C}_2\text{H}_2$  is associated with the brownish hues. Additionally, once irradiated,  $\text{NH}_4\text{SH}$  could explain the characteristic red color of the Great Red Spot.

Next, a detailed analysis of atmospheric dynamics is undertaken. Jupiter's specific thermodynamics, coupled with its rapid planetary rotation  $\Omega$ , generates a barotropic and geostrophic environment conducive to the formation of vortices and powerful zonal jets. These dynamic mechanisms contribute to the array of remarkable phenomena observed in Jupiter's atmosphere, such as the long-lasting *Great Red Spot* or the presence of distinct cyclone groups surrounding central cyclones at both poles.

In summary, this documentary synthesis provides a comprehensive overview of the chemical and dynamic elements that govern the complex atmosphere of Jupiter.



# Table des matières

<b>Table des figures</b>	iii
<b>Liste des tableaux</b>	v
<b>Introduction</b>	1
<b>Chapitre 1 Structure atmosphérique et chimique de Jupiter</b>	3
1.1 Thermosphère . . . . .	4
1.2 Stratosphère . . . . .	6
1.3 Troposphère . . . . .	10
1.3.1 Nuages d'ammoniac et brume troposphérique . . . . .	11
1.3.2 Hydrosulfure d'ammonium . . . . .	14
1.3.3 Nuages d'eau . . . . .	16
1.4 Atmosphère profonde . . . . .	16
<b>Chapitre 2 Dynamics of the jovian atmosphere</b>	19
2.1 Zonal jets . . . . .	19
2.1.1 Shallow winds . . . . .	19
2.1.2 Deep winds . . . . .	23
2.2 Cyclones and Anticyclones . . . . .	24
2.2.1 Study of the <i>Great Red Spot</i> . . . . .	26
2.2.2 Polar turbulences . . . . .	28
<b>Conclusion</b>	31
<b>Bibliographie et références</b>	32

---

*Image de couverture : Jupiter par la sonde Juno le 2 juin 2020 (NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS).*



# Table des figures

1.1	Structure verticale de l'atmosphère de Jupiter . . . . .	4
1.2	Spectre FUV de Jupiter . . . . .	5
1.3	Cheminement du cycle métanoïque au niveau de la stratosphère de Jupiter . . . . .	8
1.4	Étude des densité de colonnes de H <sub>2</sub> O dans la stratosphère . . . . .	9
1.5	Modélisation de la structure nuageuse de la troposphère jovienne . . . . .	10
1.6	Illustration de la formation de la brume troposphérique jovienne . . . . .	12
1.7	Différentes photographies des couleurs de Jupiter. . . . .	13
1.8	Photographies montrant les conséquences de l'irradiation de glaces de NH <sub>4</sub> SH à différentes températures. . . . .	15
1.9	Comparaison entre l'irradiation du NH <sub>4</sub> SH à 120 K et des observations du HST au niveau de la GTR entre 1995 et 2018. . . . .	15
1.10	Modélisation des espèces condensées sous la troposphère. . . . .	17
2.1	Cylindrical map projection of Jupiter as it was visible in October 2011, showing Jupiter's zonal jets . . . . .	20
2.2	Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune in-scale and their respective latitude-wind speed graphic. . . . .	20
2.3	Modelisations of jovian <i>shallow water model</i> with both finite and infinite L <sub>D</sub> . . . . .	22
2.4	Relation between wind speed and pressure. . . . .	23
2.5	Relation between zonal velocity and vortices. . . . .	25
2.6	Picture of Jupiter taken by Voyager 1. . . . .	25
2.7	Winds speed and direction of the GRS and its surrounding. . . . .	26
2.8	Voyager 1 and Voyager 2 imaging of the <i>Great Red Spot</i> . . . . .	27
2.9	Evolution of the size of the GRS, longitudinally and latitudinally-wise. . . . .	28
2.10	North and South poles of Jupiter, taken by the Juno spacecraft on February 2 <sup>nd</sup> 2017. . . . .	29



# Liste des tableaux

1.1 Ensemble des espèces condensées sous la troposphère. . . . .	17
--	----



# Introduction

Jupiter est de loin la planète la plus massive de notre système solaire, d'un point de vue de sa masse ou de son envergure. Considérée comme *géante gazeuse*, celle-ci arbore une apparence unique et très facilement reconnaissable.

Visible à l'œil nu depuis la Terre, elle attise depuis toujours la curiosité des observateurs, qui ont, depuis la démocratisation de l'observation optique du ciel, jeté leur dévolu sur la 5<sup>ème</sup> planète de notre système solaire.

À l'aide des connaissances en chimie et en mécanique des fluides ainsi que par l'essor de l'exploration spatiale profonde robotisée à partir du début des années 1970, l'atmosphère jovienne tend à être mieux comprise et documentée par les planétologues. L'intérêt du travail ici présenté est alors d'essayer synthétiser l'ensemble de ces connaissances et d'apporter un regard d'ensemble sur l'atmosphère de Jupiter.

Le chapitre 1 présente une description chimique de la structure verticale de l'atmosphère de Jupiter de l'extérieur vers l'intérieur, dominée très largement par l'hydrogène, les éléments/molécules associées ( $H_2$  et  $H^2$ ) mais également par le méthane qui joue un rôle plus que déterminant dans le transport des rayonnement solaires et joviens.

Le chapitre 2 présente une étude orientée vers la physique et la dynamique des différents phénomènes présent au niveau de la zone nuageuse de Jupiter, en l'occurrence les jets zonaux, les cyclones/anticyclones et sur les phénomènes de tourbillons de manière générale. L'étude va également se focaliser sur la *Grande Tache Rouge* et sur les tempêtes au sein des deux pôles jovien.



# Chapitre 1

## Structure atmosphérique et chimique de Jupiter

Contrairement aux planètes telluriques, comme la Terre ou Mars, où l'on pose la limite interne au niveau du sol et la limite externe à la disparition des forces d'attractions moléculaires par la gravitation (600 km environ pour la Terre et 110 km pour Mars), cette tâche est plus délicate dans le cas des géantes gazeuses.

L'atmosphère de Jupiter peut être découpée en plusieurs tronçons comme pour l'atmosphère terrestre (figure 1.1). On y retrouve la thermosphère, peu dense et considérée comme frontière supérieure entre l'atmosphère jovienne et l'espace ; la stratosphère, dont on considère la limite externe à 320 km (environ 0.1 Pa) et la limite interne au niveau des couches nuageuses d'ammoniac  $\text{NH}_3$  (dont on parlera en détail dans la partie 1.3). Enfin, la troposphère, siège de l'activité nuageuse météorologique de Jupiter, dont on va considérer la limite interne, celle-ci à 3000 km d'après Kaspi et al. (2018), altitude à laquelle les flux atmosphériques convergent, où s'arrêtent les vents et où l'hydrogène rentre dans une phase le rendant liquide et métallique. En comparaison avec la Terre, on voit que Jupiter n'a pas de mésosphère car celle-ci n'est pas assez marquée pour être considérée. Afin de rester concis, on va ici omettre l'étude de la structure interne et uniquement se focaliser sur l'atmosphère de Jupiter.

Comme nous allons le voir de suite, Jupiter, à l'instar des autres géantes gazeuses, a une atmosphère majoritairement composée d'Hydrogène H et d'Hélium He. Ces éléments font figures de proue dans la chimie atmosphérique jovienne, bien plus que les autres éléments communs tels que le carbone C ou l'azote N, et permettent en partie la grande diversité des processus chimiques et électromagnétiques dans les couches supérieures de l'atmosphère, à savoir des réactions de photolyses et de diffusion chimique (Bhardwaj et Gladstone, 2000). Néanmoins, en dépit de leur faible abondance par rapport à l'hydrogène et l'hélium, on observe un grand nombre de réactions mettant en rôle des hydrocarbonés tel que le méthane  $\text{CH}_4$ .

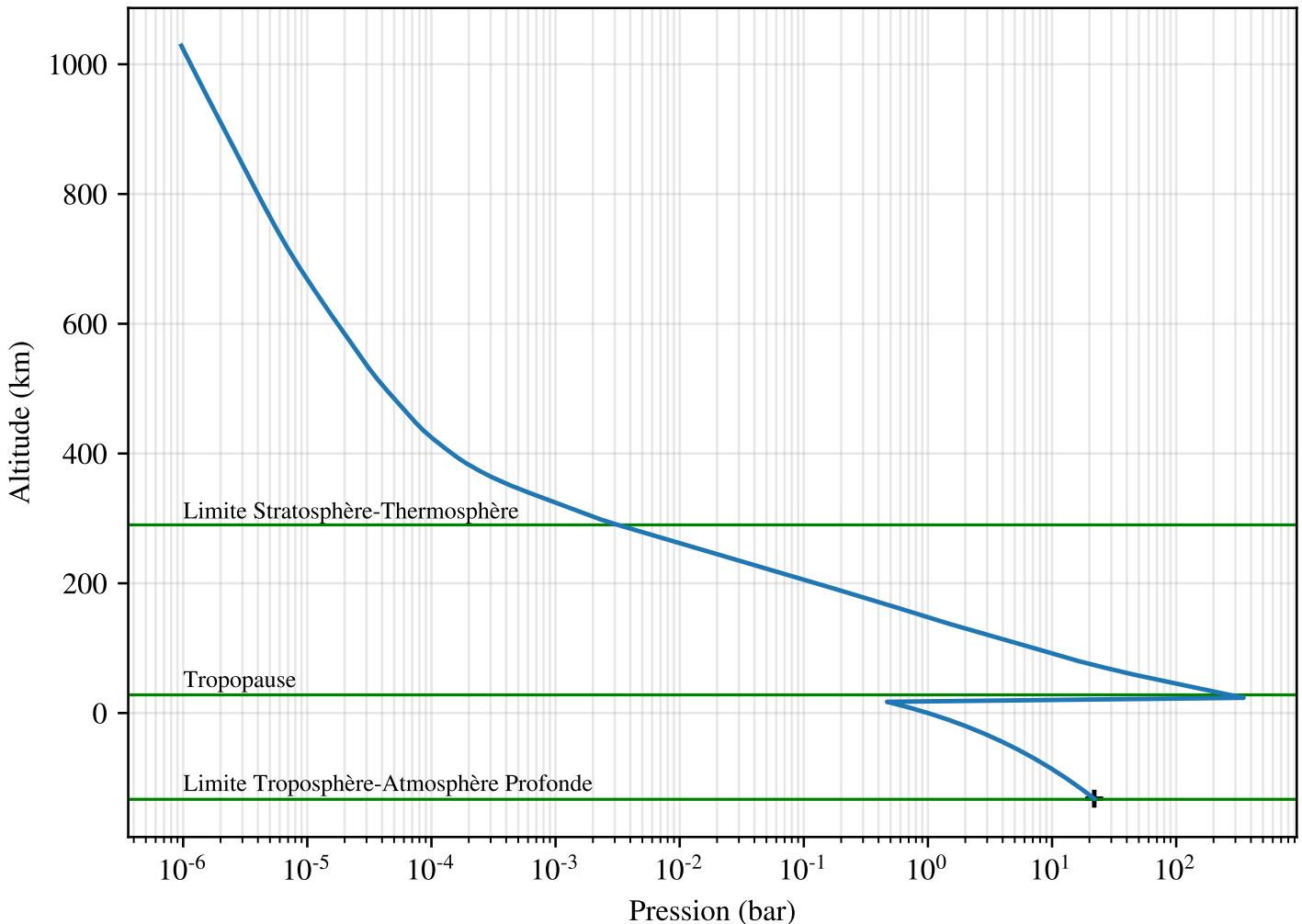


FIGURE 1.1 – Structure verticale de l’atmosphère de Jupiter, avec l’altitude en fonction de la pression. Réalisé à l’aide des données de la sonde atmosphérique Galileo (Tony Knight, 1996) ; les limites de zones sont issues de Seiff et al. (1998); Chanover et al. (1997). La croix située à  $\pm$  -132 km représente la dernière position enregistrée de la sonde.

## 1.1 Thermosphère

La thermosphère, bien que très ténue, est tout de même siège d’une électro- et photo-chimie relativement simple. En absorbant des rayonnements solaire et des rayonnements propres à Jupiter, en particulier issus de la série de Lyman dans l’ultraviolet lointain (entre 911 et 1216 Å), les molécules s’y trouvant subissent des réactions de photolyse, en particulier le dihydrogène H<sub>2</sub>, molécule presque unique de la thermosphère. Notons par ailleurs que le rayonnement  $\alpha$  de la série de Lyman de l’hydrogène, de  $\lambda=1215.67$  Å joue ici un rôle crucial quant à la chimie atmosphérique jovienne (cf 1.2).

Le dihydrogène est présent en majorité dans la thermosphère de part un mouvement chimique issue des couches inférieures de l'atmosphère : d'après Parkinson et al. (2006), du deutérule d'hydrogène HD issue de l'atmosphère inférieure remonte et se dissocie par association avec des atomes hydrogénés.

Du fait d'une faible densité atmosphérique à ce niveau (150 km à 2.5 pbar au niveau de la thermopause d'après Yelle et Miller (2004)), ce n'est plus la convection chimique et la conduction thermique qui assure la dynamique thermochimique mais la diffusion moléculaire qui, en plus de la présence quasi-unique du dihydrogène, permet d'avoir une thermosphère relativement pure et homogène.

Voyager 2, lors de son *fly-by* de Jupiter en 1979 a pu mesurer le spectre des ultraviolets lointains (FUV en anglais) de Jupiter, et a pu observer l'omniprésence des émissions Ly $\alpha$  (figure 1.2). On a remarqué que ces émissions ne sont pas uniformes, puisque l'on observe des variations de flux entre différentes zones de la thermosphère. Le spectromètre UV de la sonde Voyager 1 a permis de mettre ceci en avant puisque ce dernier, en tranchant le flux H Ly  $\alpha$  a montré qu'en dehors des régions polaires on a une intensité H Ly  $\alpha$  d'environ 10 à 20 kR ; on observe à également une intensité beaucoup plus forte au niveau des régions équatoriales, entre 70° et 170° de longitude ouest selon le système de coordonnées Jupiter III (qui suit la rotation magnétosphérique). Ce phénomène, nommé "renflement Ly  $\alpha$ " (*Ly  $\alpha$  bulge* en anglais), est ancré dans le système III puisqu'il suit le pôle magnétique de Jupiter à défaut de suivre le pôle de rotation planétaire.

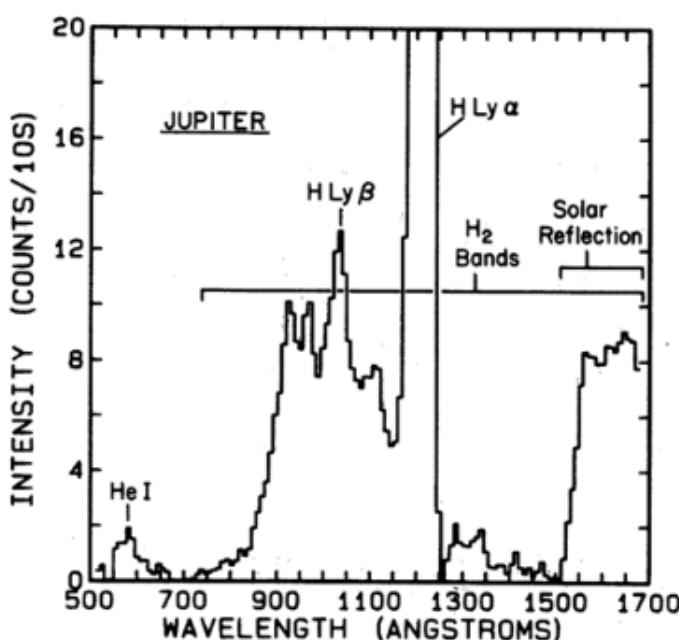


FIGURE 1.2 – Spectre FUV de Jupiter capturé par le spectromètre UV de la sonde Voyager 2. Bien qu'on puisse y apercevoir les émissions de l'hélium, du dihydrogène ainsi que les émissions autre de l'hydrogène (notamment H Ly  $\beta$ ), on remarque surtout la forte intensité des émissions H Ly  $\alpha$ . D'après Moses et al. (2000).

Concernant les émission Ly  $\alpha$  au niveau des régions polaires, une étude de ceux-ci permet de mettre en évidence que l'abondance d'hydrogène sous forme de dihydrogène au niveau des régions polaires est moindre qu'au niveau équatorial ; En revanche, en termes d'émissions on a, d'après Bhardwaj et Gladstone (2000), uniquement mesuré des émissions H Ly  $\alpha$  qui ne dépassent pas 10 kR, bien que certaines zones, les *aural spot zones*, sont le siège d'émissions à plus de 100 kR, du fait de l'interaction de la magnétosphère jovienne avec celle de Io, lune galiléenne la plus proche de Jupiter. Cette dernière, en approvisionnant la magnétosphère jovienne d'ions lourds, va donner lieu à un torus de plasma tout le long de son orbite (torus nommé IFT ou *Io Flux Tube*) ; celui-ci va influencer les rayons magnétiques de Jupiter au niveau des zones polaires et ainsi perturber l'intensité des émissions (Bhardwaj et Michael, 2002; Mura et al., 2018).

Abordé brièvement en début de cette partie, on observe un certain volume de deutérium D au niveau de la thermosphère jovienne ; l'observation des émissions Ly  $\alpha$  a permis de déceler la présence d'émissions D Ly  $\alpha$  et d'ainsi déduire un ratio D/H avoisinant  $5.9 \pm 1.4 \times 10^{-5}$  (Yelle et Miller, 2004). La présence de deutérium est en partie explicable grâce à la réaction du deutére d'hydrogène avec un atome d'hydrogène précédemment cité ; cependant, il semblerait qu'une partie du deutérium dissocié réagisse avec du dihydrogène et du méthyl CH<sub>3</sub> d'après Parkinson et al. (1999), permettant de favoriser la diversité chimique des espèces deutérées hydrocarbonée, puisque l'on retrouve entre autres des molécules de CH<sub>2</sub>D, CH<sub>3</sub>D et de C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>D à la suite de ces réactions. Néanmoins, la distribution de deutérium est intrinsèquement liée à la distribution du méthane dans l'atmosphère jovienne (cf 1.2), et par conséquent à la distribution des espèces deutérées.

Nous savons que le moteur principal de l'excitation des atomes de deutérium D Ly  $\alpha$  est l'absorption de photons solaires dans cette longueur d'onde ; nous pouvons mettre en équation ces flux de photons solaires selon les émissions H Ly  $\alpha$  et la ligne de visée de la sorte (Parkinson et al., 2006) :

$$S(x) = \frac{\pi F}{2\sqrt{\pi}x_{dis}}(e^{-((x-x_{off}-x_r)/x_r)^2} + e^{-((x+x_{off}-x_r)/x_r)^2}) \quad (1.1a)$$

Où  $\pi F$  est le flux total de la ligne incidente sur la frontière supérieure atmosphérique,  $x$  la longueur d'onde du centre de la ligne,  $x_{off}$  le décalage des courbes gaussiennes selon la ligne centrale,  $x_{dis}$  la dispersion solaire et  $x_r$  :

$$x_r = \Delta + \frac{\lambda R \Omega \cos(\theta) \sin(\Phi)}{c} \quad (1.1b)$$

$x_r$  permet de prendre en compte le décalage des longueurs d'ondes du fait de l'effet Doppler dû à la rotation planétaire ;  $\Delta$  est la différence de fréquence entre H Ly  $\alpha$  et D Ly  $\alpha$ ,  $\lambda$  la ligne de la fréquence d'étude,  $\theta$  la latitude solaire de Jupiter et  $\Phi$  la longitude solaire de Jupiter.

## 1.2 Stratosphère

L'un des gaz les plus abondant d'un point de vue spectroscopique dans la stratosphère jovienne est le méthane CH<sub>4</sub>, qui joue un rôle décisif dans la photochimie

locale ainsi que dans contrôle de la radiation moléculaire ; les températures n'étant pas suffisantes à ce niveau, le méthane ne se condense pas et reste dans son état gazeux.

Des études menées à la fin des années 2000 (Park et al., 2008) ont permis de montrer que le méthane est aussi sujet à pouvoir se photo-dissocier à l'aide de rayonnements de type Lyman  $\alpha$ ; Le méthane, d'après ces études ainsi que d'après le modèle utilisé par Moses et al. (2005), se photo-dissocie tel que<sup>1</sup> :



Néanmoins, dans le cadre de l'atmosphère jovienne, seules 2 réactions sont réellement importantes : la réaction 1.2b et la réaction 1.2e, 75% et 25% respectivement selon des approximations de Strobel (1969).

Cette réaction de photolyse permet la création de molécules instables  $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}$  et  $\text{H}$  mais qui, en réagissant de nouveau avec du méthane, permettent de créer des hydrocarboneés complexes, en l'occurrence de l'éthane  $\text{C}_2\text{H}_6$  et de l'acétylène  $\text{C}_2\text{H}_4$  suivant ces réactions (Moses, 2000)<sup>2</sup> :



Il est à noter que ces réactions de photolyse méthanoïque sont communes aux géantes gazeuses du système solaire externe. La figure 1.3 montre l'ensemble des réactions méthanoïques présentes au niveau de la stratosphère jovienne.

---

1.  $h\nu$  correspond à l'émission d'un rayonnement ultraviolet.

2. M représente ici un troisième corps chimique tel que  $\text{H}_2$ .

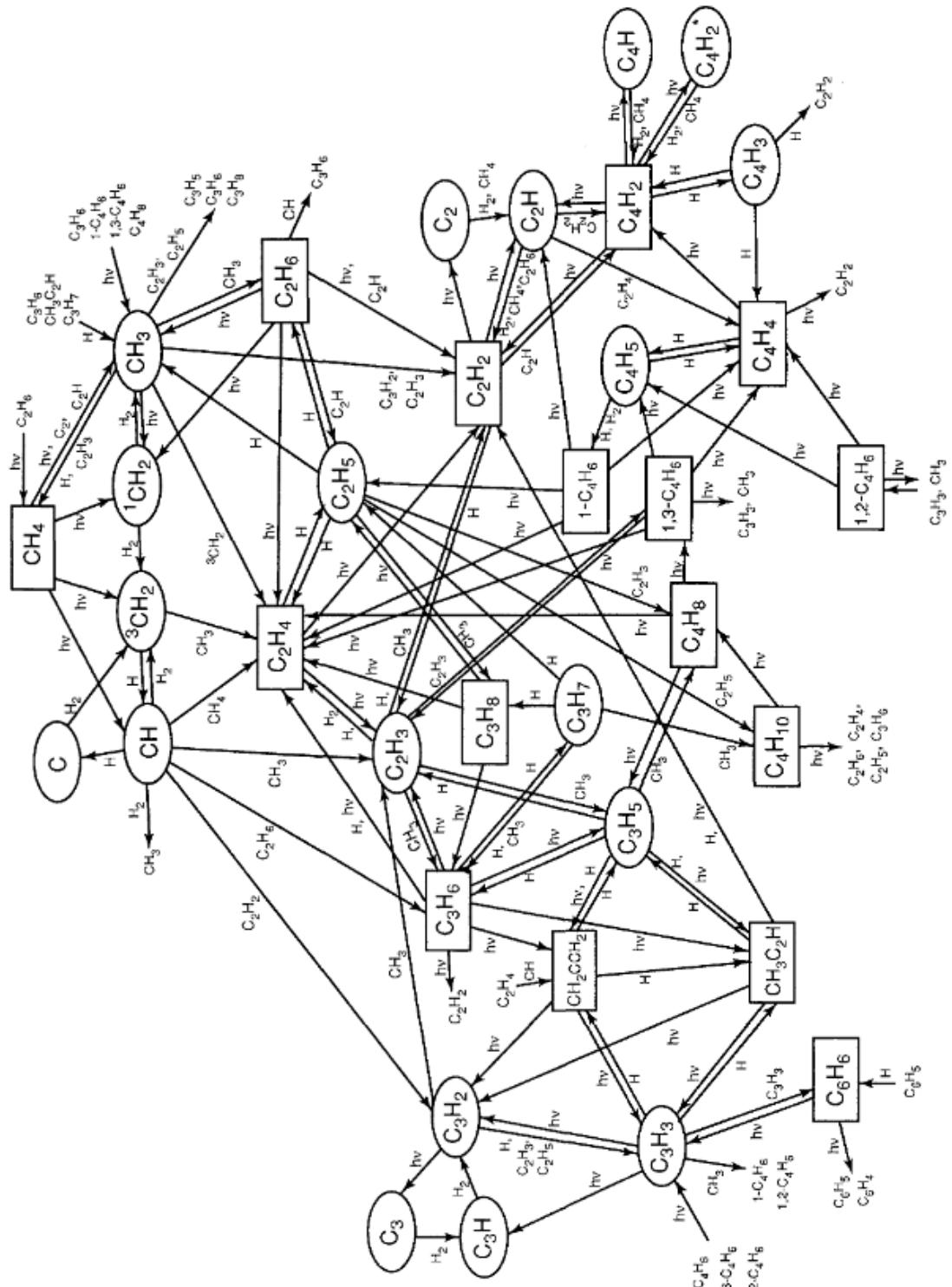


FIGURE 1.3 – Cheminement du cycle métañoïque au niveau de la stratosphère de Jupiter, d'après Moses et al. (2000).

On observe également de façon minime la présence d'oxygène au niveau de la stratosphère, limitée aux pressions supérieures à 2 mbar. En partie lié à la rentrée de matériel extra-jovien dans l'atmosphère (comètes, anneaux, etc ...), ils permettent de contribuer à une photochimie continue, et surtout à la formation de molécules d'eau  $H_2O$  et de dioxyde de carbone  $CO_2$  d'après Moses (2000); ces derniers vont pouvoir se condenser et se diffuser dans les couches inférieures de l'atmosphère, en particulier l'eau, dans une phase solide et liquide, qui va activement participer à la dynamique météorologique troposphérique.

Néanmoins, une étude poussée de la répartition de l'eau au niveau de la troposphère permet de montrer que l'impact de la comète *Shoemaker-Levy 9* en juillet 1994 (latitude 44 °S) a joué un rôle décisif dans la répartition moléculaire atmosphérique des molécules d'eau. La figure 1.4, issue d'une étude de la distribution spatiale des molécules d'eau dans la stratosphère jovienne (Cavalié, T. et al., 2013), nous montre que la densité de colonne de l'eau, et par conséquent sa distribution, se situe majoritairement dans les basses latitudes. Ceci semble donc indiquer que les sources telles que les anneaux ne sont pas les sources uniques, puisque la distribution devrait se trouver principalement au niveau de l'équateur.

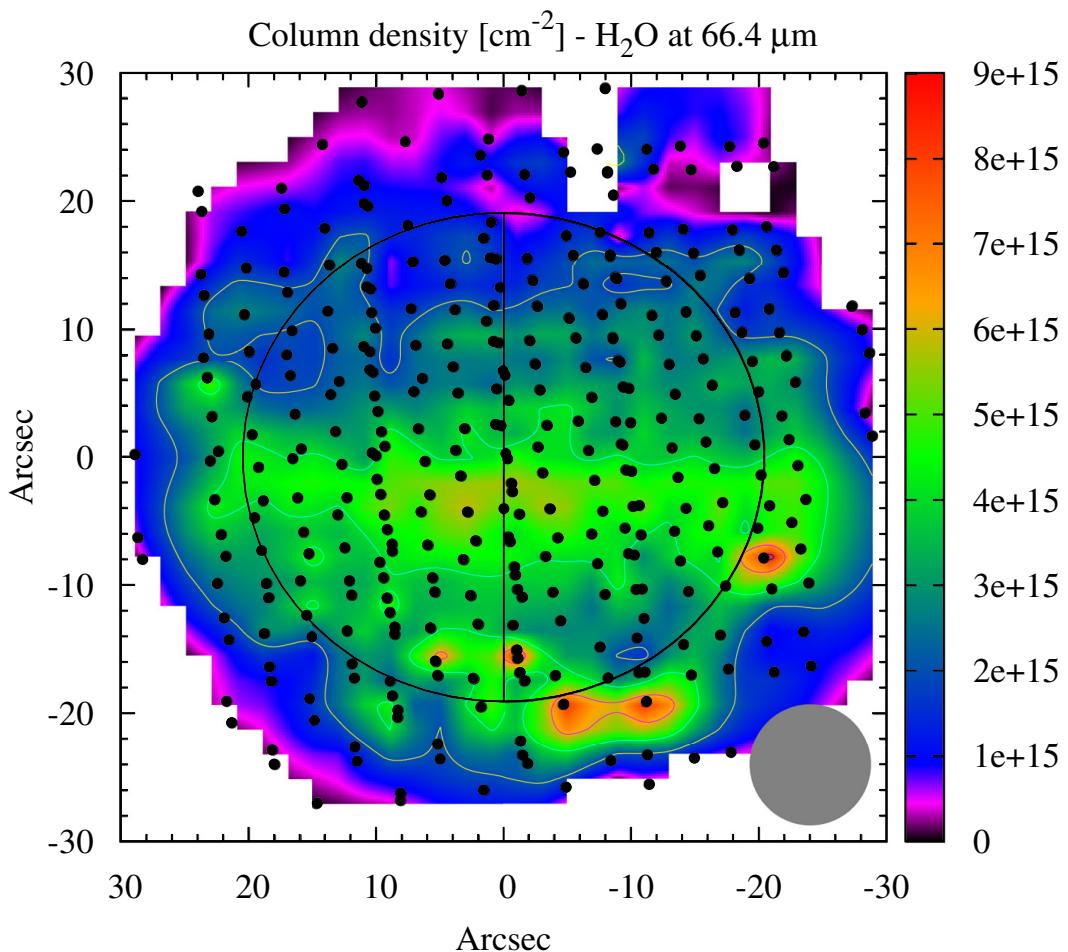


FIGURE 1.4 – Étude des densité de colonnes de  $H_2O$  dans la stratosphère, d'après Cavalié, T. et al. (2013).

En réalité, il est très certain que *Shoemaker-Levy 9* ait apporté la majorité des molécules d'eau dans l'atmosphère, puisque la figure 1.4 nous montre que la répar-

tition en  $\text{H}_2\text{O}$  concorde avec sa zone d'impact. Ceci est d'autant plus vrai puisque dans la conclusion de Cavalié, T. et al. (2013), on voit que la répartition de la température n'explique pas cette asymétrie, mais que l'impact de *SL9* si.

Enfin, on a la présence constaté d'autres molécules, qui jouent un rôle moindre dans la photochimie locale. Sans être exhaustif, on peut citer les molécules phosphatées, azotées ou sulfurées. Certaines de ces molécules, au niveau de la troposphère, peuvent se condenser comme l'ammoniaque  $\text{NH}_3$ ; cependant d'autres arrivent à passer la tropopause et pénétrer la stratosphère pour y subir des réactions de photolyse, notamment grâce à une association avec du deutérium comme discuté précédemment.

### 1.3 Troposphère

Siège de l'activité météorologique et dynamique de l'atmosphère de Jupiter, la troposphère est de loin la zone atmosphérique la plus complexe et la plus mystérieuse.

Depuis les années 1990, les spectromètres de masse des sondes Galileo et Cassini, respectivement le *NIMS* (Near Infrared Imaging Spectrometer) et le *CIRS* (Composite Infrared Spectrometer), ont permis d'étudier en détail la troposphère jovienne. D'après certaines estimations, on pourrait trouver dans cette zone, dans l'ordre, de l'ammoniac  $\text{NH}_3$ , de l'hydrosulfure d'ammonium  $\text{NH}_4\text{SH}$  et de l'eau  $\text{H}_2\text{O}$ , visibles sur la figure 1.5.

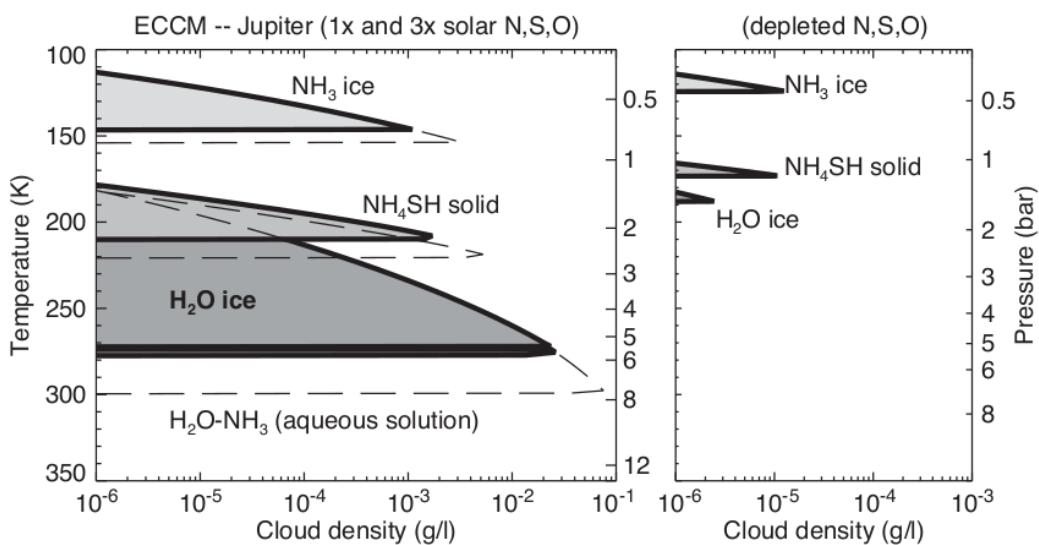


FIGURE 1.5 – Modélisation de la structure nuageuse de la troposphère jovienne d'après S. Atreya et al. (2005).

Il est important néanmoins de prendre en compte le caractère hétérogène de l'atmosphère de Jupiter; en effet, on tend à souvent dissocier les mesures obtenues à l'aide du néphélomètre de la sonde atmosphérique Galileo, qui est descendu dans une zone particulièrement aride et très localisé (*hot spots* à  $5\mu\text{m}$ ), par rapport aux

autres mesures plus globales ; ces mesures sont dans les faits très différentes des modèles plus globaux de l'atmosphère planétaire.

### 1.3.1 Nuages d'ammoniac et brume troposphérique

Les nuages d'ammoniac ont été déterminés la première fois par K. H. Baines et al. (2002) à partir des données des sondes susnommées. En particulier Galileo, qui à l'aide du NIMS a permis de mettre en lumière les SIACS, *Spectrally Identifiable Ammonia Clouds*, qui représentent d'après cette étude seulement 1 % de la surface de la troposphère jovienne. Ils sont d'ailleurs témoins de la dynamique atmosphérique locale et générale de Jupiter. On voit que d'après le modèle utilisé par K. H. Baines et al. (2002) les nuages d'ammoniac sont, sous forme de glace, présents presque exclusivement au niveau des *hot spots* observables à  $5 \mu\text{m}$ , et plus particulièrement près du *hot spot* situé à une latitude de  $10^\circ$  Nord de la Grande Tâche Rouge dans l'hémisphère sud. L'apparition de ces nuages semble être liée à un cycle similaire à celui du méthane précédemment discuté ; il semblerait que l'ammoniac, présent dans la troposphère à des niveaux de pressions inférieures à 600 mbar, soit transporté jusqu'au niveau de la stratosphère, formant donc par conséquent de nouveaux nuages, expliquant le jeune âge des nuages observés : entre plusieurs jours et plusieurs semaines.

Le CIRS de Cassini a aussi réussi à mettre en évidence ces SIAC, comme le montre le modèle utilisé par Wong et al. (2004) qui a permis de mettre en lumière la présence de nuages de glace  $\text{NH}_3$  à des longueurs d'onde de  $10 \mu\text{m}$ . Cependant, il est compliqué d'observer des particules d'ammoniac à cette longueur d'onde puisque celle-ci nécessite une quantité de particules non négligeable, que l'on retrouve le plus souvent à des pressions avoisinant les 500 mbar.

En dépit de ces modélisations, d'autres études, comme celles de S. Atreya et al. (2005) et Wong et al. (2004) montrent que les nuages d'ammoniac sont dans les faits présents sur l'ensemble de la surface nuageuse de la troposphère jovienne. Cette présence n'est néanmoins pas homogène sur l'ensemble de la troposphère ; de Pater (1986) montre que la valeur d'épuisement de  $\text{NH}_3$  varie entre zones et bandes, entraînant des différences au niveau de la pression de condensation ( $\approx 1$  bar), et donc des variations d'opacité au niveau des nuages.

Braude et al. (2020) arrive à une conclusion similaire, où l'on retrouve de façon presque homogène une couche de nuage ayant un index de réfraction d'environ 1.6 et à une pression de  $1.4 \pm 0.3$  bar. On note tout de même que la sonde atmosphérique Galileo a pu, en pénétrant l'atmosphère jovienne au niveau d'une zone excessivement sèche, étudier un nuage de  $\text{NH}_3$  détecté à 1.34 bar et prenant sa base à  $\approx 500$  mbar.

Outre ces nuages de glaces, l'ammoniac est présent de façon non négligeable sous forme de brume dans la partie supérieure de la troposphère, comme montré par Banfield et al. (1998).

Cette brume interagit avec la stratosphère située au dessus d'elle de façon active ; composée principalement de particules issues de la condensation de PAHs, *Polyyclic Aromatics Hydrocarbons*, ces dernières sont issues du cycle méthanoïque discuté dans la section 1.2. Les principaux hydrocarbonés sont ici le benzène  $\text{C}_6\text{H}_6$

(nommé  $A_1$  sur la figure 1.6) ainsi que les molécules ayant un radical -phényl  $r\text{-C}_6\text{H}_5$  (nommé  $A_{1-}$ ).

Hormis les hydrocarbonés susnommés, on peut noter la présence d'Hydrazine  $\text{N}_2\text{H}_4$ , issue de la photolyse d'amidure  $\text{NH}_2$  elle même issue de la photolyse de l'ammoniac. Cette molécule a une place non négligeable dans le cas de l'observation de l'ammoniac car, étant présent à des niveaux d'épaisseur optique similaires à ceux de l'ammoniac (100 à 700 mb d'après Tomasko et Smith (1988)), l'hydrazine masque la couverture spectrale de l'ammoniac et donc empêche son observation, expliquant en partie sa découverte à grande échelle relativement récente.

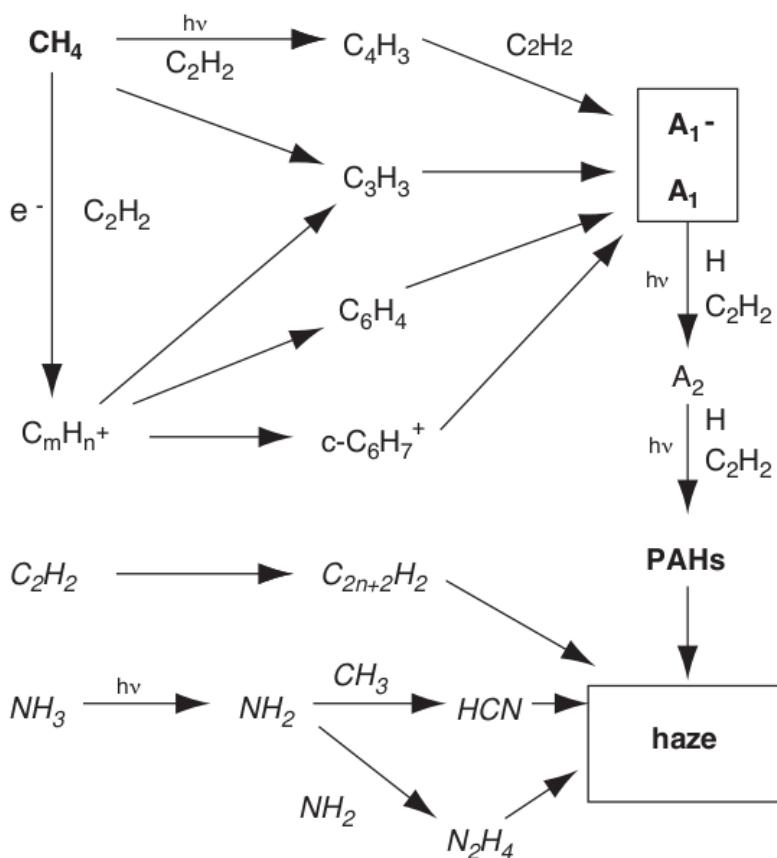


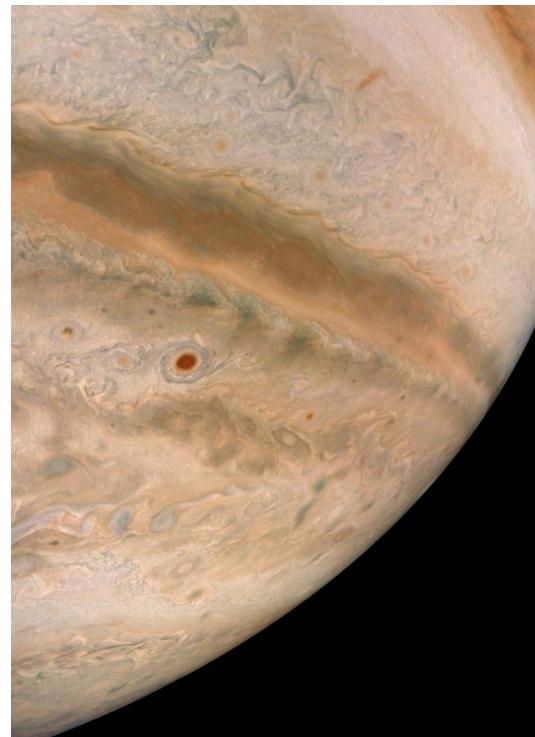
FIGURE 1.6 – Illustration de la formation de la brume troposphérique jovienne par l'ammoniac et le méthane, d'après S. Atreya et al. (2005).

Il est également important de mentionner que ces parties de la troposphère ont une importance à l'échelle planétaire, étant donné que les couleurs de Jupiter en dépendent. En effet, les couleurs de Jupiter, visible sur les figures 1.7, sont issus du reflet de la lumière du Soleil sur les nuages susnommés ; d'après Sromovsky et al. (2017), on suppose que les nuages blancs des zones sont issus du reflet des rayons solaires sur les molécules condensées d'ammoniac et d'hydrosulfure d'ammonium. Cependant on assiste à un phénomène plus complexe au niveau des *ceintures*, aux teintes plus orangées/marron. Plusieurs études semblent s'accorder sur un modèle plus ou moins accepté de *crème brûlée* (en français dans le texte), où l'on considère une couche plus ou moins fine d'atomes chromophores qui serait située juste au dessus des nuages d'ammoniac. Certains modèles, dont celui de Braude et al. (2020) suggèrent que la Grande Tâche Rouge et l'ensemble des ceintures partagent

en réalité un chromophore similaire, situé respectivement entre  $0.7 \pm 0.1$  bar &  $0.6 \pm 0.1$  bar et  $0.2 \pm 0.1$  bar. Au niveau des propriétés de ces chromophores, il est admis que ceux-ci absorbent les longueurs d'ondes du bleues de façon importante.



(a) Jupiter capturée par la sonde Cassini le 13 Novembre 2003 (NASA/JPL)



(b) Vue rapprochée de Jupiter lors du 36-ème Fly-By de la sonde Juno, 9 Novembre 2021 (NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS)

FIGURE 1.7 – Différentes photographies des couleurs de Jupiter. On voit bien ici la différence de couleur entre les zones (blanchâtres) et les ceintures (orangeâtres).

Il est cependant compliqué d'affirmer avec sûreté la nature et l'histoire de la formation de ces chromophores. On pense néanmoins que l'ammoniac, une fois photo-dissocié, réagit avec de l'acétylène  $C_2H_2$ ; le produit serait alors à l'origine des chromophores rougeâtres disposés dans la troposphère jovienne. C'est ce que montre Sromovsky et al. (2017), où ces réactions semblent être applicables à l'ensemble de la planète ; dans leur modèle, cette hypothèse semble pouvoir être appliquée à plusieurs situations aux contextes différents sur Jupiter (dans ce cas pour la *Grande Tache Rouge*, la *ceinture équatoriale sud*, la *zone équatoriale* et la *ceinture équatoriale nord*). La seule différence se situerait au niveau des tailles de particules : de  $0.13 \mu\text{m}$  pour la GTR à  $0.33 \mu\text{m}$  pour la CEN.

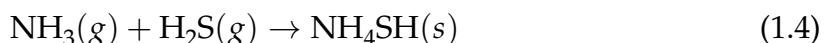
L'étude des chromophores par Carlson et al. (2016) a permis d'obtenir un résultat similaire au niveau de la GTR ; leur modèle d'expérimentation consiste à la photolyse d'un mélange d'ammoniac et d'acétylène sous forme gazeuse à l'aide de lampes UV de longueurs d'ondes  $\lambda=202.5, 206.2$  et  $213.9$  nm. Cette réaction a permis d'obtenir des résultats similaires aux observations effectuées au niveau de la GTR, et ce même en réitérant l'expérience en y rajoutant du méthane, où les résultats restent ici identiques.

Cependant cette expérience n'est pas à prendre pour acquise, puisque comme indiqué en conclusion de cette expérience, cette dernière considère que l'ammoniac et l'acétylène sont présents sous forme gazeuse ; or comme nous avons pu le voir, l'ammoniac est ici présent sous forme de glace/sel. Cette expérience omet également tous les aérosols venant de la stratosphère. La conclusion s'accorde également à dire, en association avec l'étude de Braude et al. (2020), que les chromophores ne sont peut-être pas homogènes à l'ensemble de Jupiter, l'argument principal ici étant la GTR ayant "rougit" plus que le reste depuis les observations de Cassini au début des années 2000 ; ce chromophore doit donc pouvoir être capable d'absorber davantage les longueurs d'onde tendant vers le bleu.

### 1.3.2 Hydrosulfure d'ammonium

Brièvement évoqué plus tôt, le sel d'hydrosulfure d'ammonium  $\text{NH}_4\text{SH}$  serait l'un des ingrédients de la couleur blanche de Jupiter, mais également le supposé chromophore responsable du rougissement de la GTR. Ce sel est relativement peu étudié dans sa globalité, et est donc peu présent dans la littérature abordant l'atmosphère jovienne, en dépit des nombreux modèles prédisant sa présence dans la troposphère.

Bien que son origine et son mode de formation soient encore peu documentés, on suppose que l'hydrosulfure d'ammonium, composé chimique composé des ions  $\text{NH}_4^+$  et  $\text{SH}^-$ , se formerait sous forme de sel dans la troposphère jovienne à l'aide d'un mélange de  $\text{NH}_3$  et de sulfure d'hydrogène  $\text{H}_2\text{S}$  dans une phase gazeuse, mélange qui se condenserait à 2.2 bar ( $\approx 210$  K) d'après S. K. Atreya et al. (1998) :



Concernant son rôle en tant que chromophore, des études (Loeffler et al., 2015, 2016; Loeffler et Hudson, 2018) tendent à montrer que l'irradiation du  $\text{NH}_4\text{SH}$  permet à ce dernier d'absorber de façon plus importante les rayonnements UV, et par conséquent refléter davantage les longueurs d'ondes rougeâtres.

Ceci est particulièrement visible dans Loeffler et Hudson (2018), d'où est issue la figure 1.8, où de la glace d'hydrosulfure d'ammonium est irradiée à l'aide de protons ayant pour énergie 9 MeV, sur une gamme de température allant de 10 à 160 K.

Cette irradiation permet à la glace d'obtenir des teintes particulièrement intéressantes ; ces dernières, si observées au spectrogramme, correspondent aux observations effectuées par le télescope spatial Hubble entre 1995 et 2018, visibles sur la figure 1.9.

Cette absorption des UV discutée précédemment est particulièrement visible ici, que ce soit pour Loeffler et al. (2016) ou le HST ; il en est de même pour la réflexion des longueurs d'onde tendant vers le rouge où nous avons effectivement une augmentation de l'indice de réflexion. De manière générale, il y a une concordance certaine entre les valeurs issues de l'expérimentation sur la glace de  $\text{NH}_4\text{SH}$  et les valeurs obtenues par le HST, quel que soit le niveau de *rougissement* de la GTR.

Plusieurs produits de la radiolyse du  $\text{NH}_4\text{SH}$  peuvent être à l'origine de ce *rougissement* : des anions tri-sulfures  $\text{S}_3^-$ , ayant une forte absorbance à des longueurs

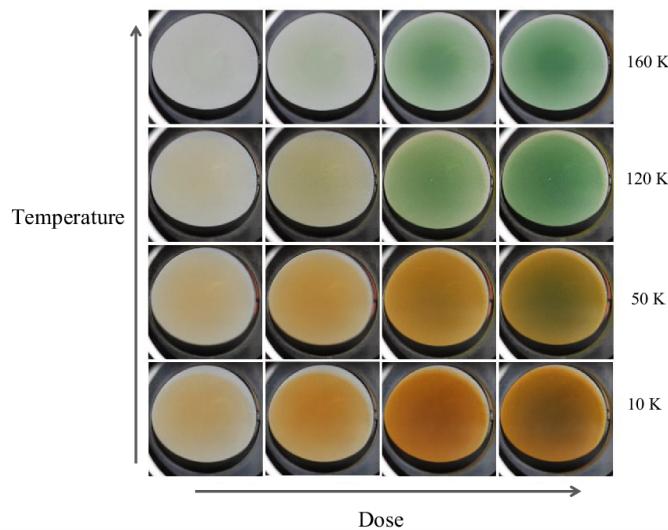


FIGURE 1.8 – Photographies issues de Loeffler et Hudson (2018) montrant les conséquences de l'irradiation de glaces de  $\text{NH}_4\text{SH}$  à différentes températures.

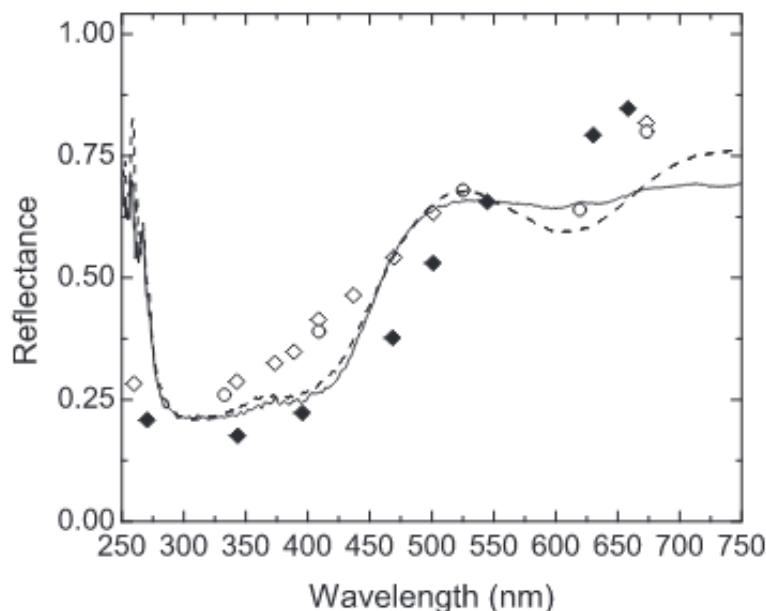


FIGURE 1.9 – Comparaison entre l'irradiation du  $\text{NH}_4\text{SH}$  à 120 K (réchauffé à 190 K - - - et à 200 K —) et des observations du HST au niveau de la GTR en 1995 ○, 2008 ◇ et 2015 ♦, d'après Loeffler et al. (2016).

d'ondes  $\lambda \approx 600$  nm (visible sur le *creux* de la figure 1.9 sur la ligne - - -) et de nombreuses espèces poly-sulfurées telles que  $\text{NSx}^-$  et  $\text{Sx}^{2-}/\text{HSx}$ , ayant des longueurs d'ondes oscillant entre 300 et 500 nm. Parmi ces deux espèces, on retrouve notamment  $\text{S}_6^{2-}$  ( $\lambda_{max} \approx 405$  nm) et  $\text{S}_2^-$  ( $\lambda_{max} \approx 390$  nm), candidats les plus probables pour la coloration verdâtre dans les parties supérieures de la figure 1.8 d'après Loeffler et al. (2016).

D'une manière générale, l'hydrosulfure d'ammonium pourrait être le chromophore discuté à la toute fin de la sous-section 1.3.1 ; nous ne sommes néanmoins pas en

mesure à l'heure actuelle d'affirmer que le NH<sub>4</sub>SH est le chromophore cherché, puisque comme indiqué par Loeffler et al. (2016), les conditions réelles exactes d'irradiation au niveau de la troposphère jovienne sont encore inconnues.

### 1.3.3 Nuages d'eau

Dernier étage de la troposphère jovienne, on suppose que de nombreux nuages d'eau condensés opaques subsistent à la base de celle-ci. Présent en théorie à des températures  $\approx 250$  K et à des pression de l'ordre de  $\approx 5$  bar (d'après la figure 1.5 et Bjoraker et al. (2018); Yair et al. (1992); West et al. (2004)), il est cependant compliqué d'observer le H<sub>2</sub>O sous forme de gaz du fait de son absorption de micro-ondes moindre que celle de NH<sub>3</sub>; il en est de même pour les détections effectuées par le NIMS évoqué plus tôt, qui, d'après West et al. (2004), n'a pas permis de faire des observations directes de quelconques nuages d'eau.

On suppose néanmoins qu'avec les températures troposphériques l'eau se trouverait également sous forme de glace condensée, mais qu'une portion inférieure, mélangée à de l'ammoniac, donnerait une solution liquide H<sub>2</sub>O-NH<sub>3</sub>.

Cependant, le manque de moyens quant à l'observation de ces nuages d'eau ne permet pas d'affirmer avec certitude leur composition ni leur dynamique - comme en témoigne le manque de littérature sur le sujet. Nous ne pouvons également pas nous fier aux données amassées par la sonde atmosphérique Galileo, puisque cette dernière, lors de sa descente dans un *hot-spot* 5 μm n'en a observé aucun (West et al., 2004). D'une manière générale, la façon dont l'eau est présente, bien que confirmée de par les modèles thermodynamiques la prédisant ainsi que par des observations éparses, est pour le moment purement théorique.

## 1.4 Atmosphère profonde

L'étude des nuages d'eau, comme vu juste au-dessus, relève déjà de l'inconnu ; il en est d'encore plus pour l'atmosphère profonde. La transition de l'atmosphère vers ce que l'on considère ici comme le "sol" de Jupiter, une couche très épaisse d'hydrogène moléculaire H<sub>2</sub> dans une phase assez spécifique de *métallique* qui est liquide (Leverington, 2007), semble être parsemée de plusieurs couches succinctes de différentes espèces chimiques ayant pu se condenser dû aux conditions de pressions et de températures extrêmes ; la figure 1.10, issue d'un modèle utilisant les données des sondes Juno et Galileo, nous montre l'ensemble des espèces chimiques théoriquement condensées présentes à ce niveau et la table 1.1 nous montre la liste des espèces considérées pour cette figure.

Il est intéressant de voir la diversité chimique, comme par exemple la présence de potassium K ou de lithium Li ; nous pouvons cependant voir que ce modèle diffère d'autres, comme celui de Wang et al. (2016) par exemple, de par la présence de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (s) non présent dans le dernier.

D'une manière générale, il subsiste une énorme part de mystère quant à la compréhension globale de l'atmosphère profonde de Jupiter, de sa chimie exacte à sa dynamique. Néanmoins, la mission JUICE de l'ESA ayant été récemment lancée a, outre la compréhension des lunes glacées joviennes, pour objectif d'analyser et d'améliorer nos connaissances quant à la dynamique profonde de l'atmosphère de la plus grande planète de notre système d'ici 2031 (Félix, 2023).

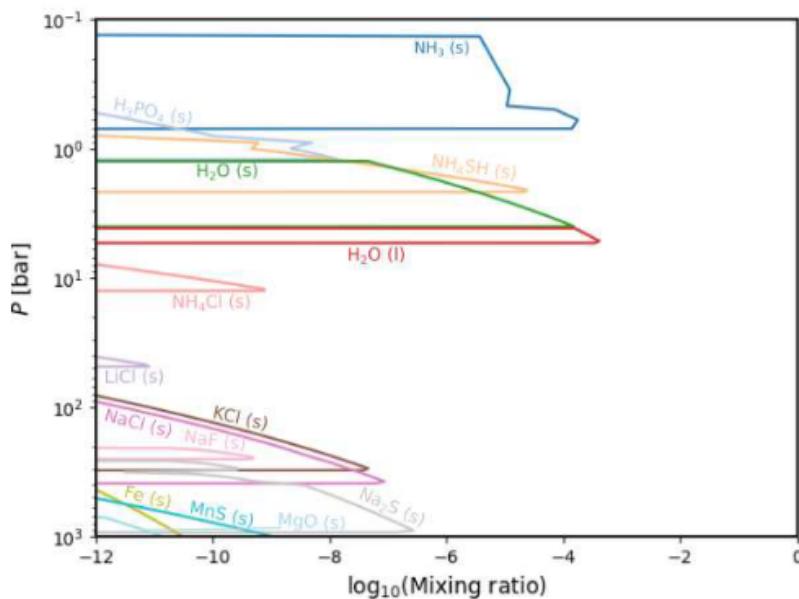


FIGURE 1.10 – Modélisation des espèces condensées sous la troposphère, d’après Rensen et al. (2023).

TABLE 1.1 – Ensemble des espèces condensées sous la troposphère d’après le modèle de Rensen et al. (2023) (figure 1.10).

Molécule	Pression de formation (bar)	Température de formation (K)
$\text{NH}_3$ (s)	0.7	148.04
$\text{H}_3\text{PO}_4$ (s)	1.212	187.30
$\text{NH}_4\text{SH}$ (s)	2.16	224.24
$\text{H}_2\text{O}$ (s)	4.01	18730
$\text{H}_2\text{O}$ (l)	5.37	295.93
$\text{NH}_4\text{Cl}$ (s)	12.60	38183
$\text{LiCl}$ (s)	48.59	586.66
$\text{NaF}$ (s)	251.94	919.88
$\text{KCl}$ (s)	307.64	973.44
$\text{NaCl}$ (s)	388.65	1093.48
$\text{Na}_2\text{S}$ (s)	931.29	1321.77
$\text{MgO}$ (s)	1262.16	1434.49
$\text{MnS}$ (s)	1834.93	1583.10
$\text{Fe}$ (s)	3176.41	1820.93



# Chapter 2

## Dynamics of the jovian atmosphere

Jupiter has a vast array of different mechanisms when it comes to the motion within its atmosphere. Whilst it stills hard to fully conceptualize the inner parts of the dynamical atmosphere, we can already simulate precisely the external layer thanks to the data gathered by the Galileo, Cassini and Juno spacecrafts. Studying the atmosphere of Jupiter is great tool to understand its chemistry, composition and evolution, thus understanding atmospheres of gas giants in a general manner.

### 2.1 Zonal jets

#### 2.1.1 Shallow winds

We are going, first, to introduce the concept of *belts* and *zones*. We briefly mentioned those before (cf. subsection 1.3.1 and figure 1.7), but it's important to fully understand their impact toward Jupiter's atmosphere.

To put in a nutshell, zones are the white bands and belts are the brownish bands (A. Ingersoll et al., 2000), as visible on figure 2.1. Apart from the color, these two types of bands also differ when it comes to the direction of their wind: also known as *zonal jets*, zone's zonal jets are moving eastward while belt's zonal jets are moving westward (both relative to the pole of Jupiter and to the System III seen in section 1.1).

Surprisingly enough, these structure seem to be stable in time; as mentioned by A. Ingersoll et al. (2000), images taken by Voyager and Cassini show the same number of equatorial plumes, although they do differ in a few different ways, especially when it comes to how the plumes are defined within the atmosphere.

: Easterly jovian jets tend to be dominant in comparison to westerly winds; this is easily explainable thanks to Jupiter's planetary parameters. Jupiter has a fast sidereal rotation period of  $\approx 10$  h in a prograde fashion, thus means that this planet is in a geostrophic state. This fast rotation is one of the main component of the jet dynamic; small scale turbulent motion tend to feed large-scale zonal jets. This, and the curvature boundary due to the spherical shape of the planet can be quantified using the Rossby parameter  $\beta$  as shown by Heimpel et al. (2005). We consider the *Rhines length*, inversely proportional to  $\beta$ , where the transition between small to large turbulence stops and characterize the width of zones and belts.

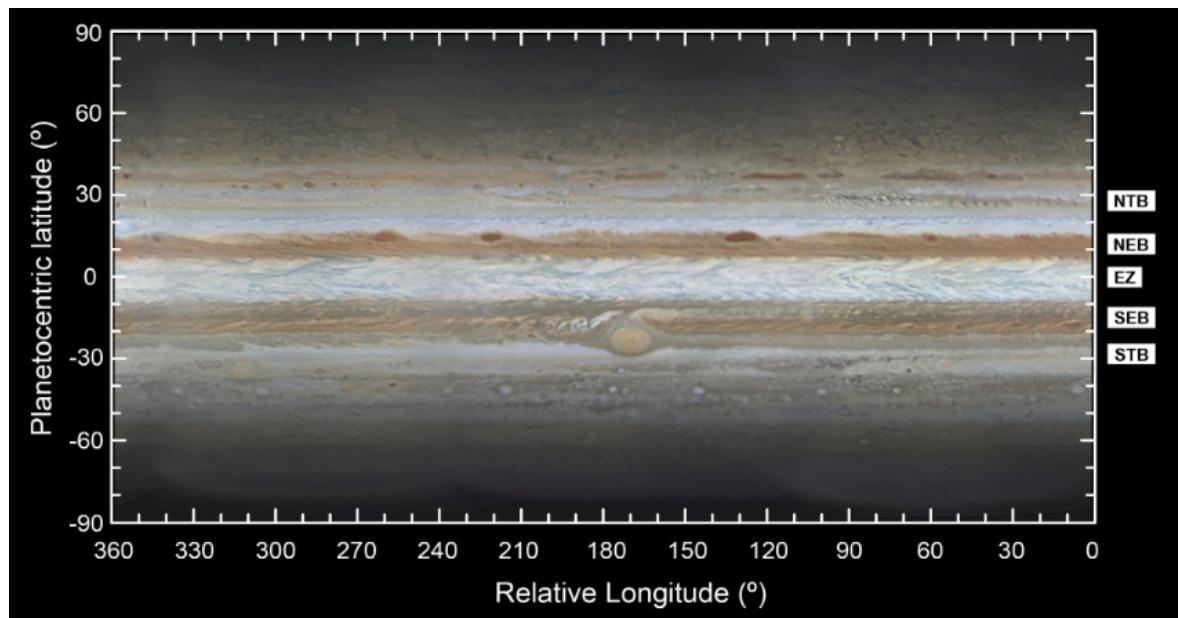


Figure 2.1 – Cylindrical map projection of Jupiter as it was visible in October 2011, showing Jupiter's zonal jets. From Barrado-Izagirre, N. et al. (2013).

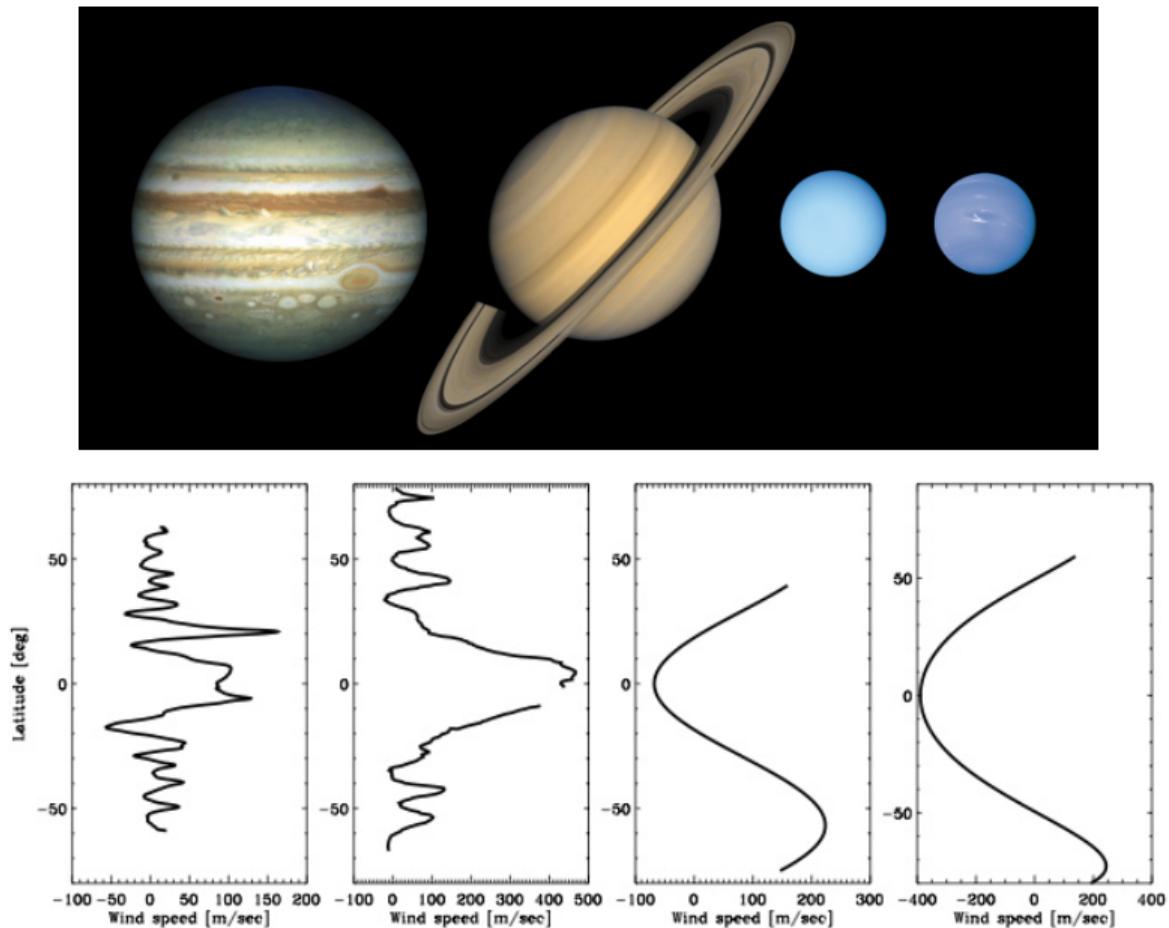


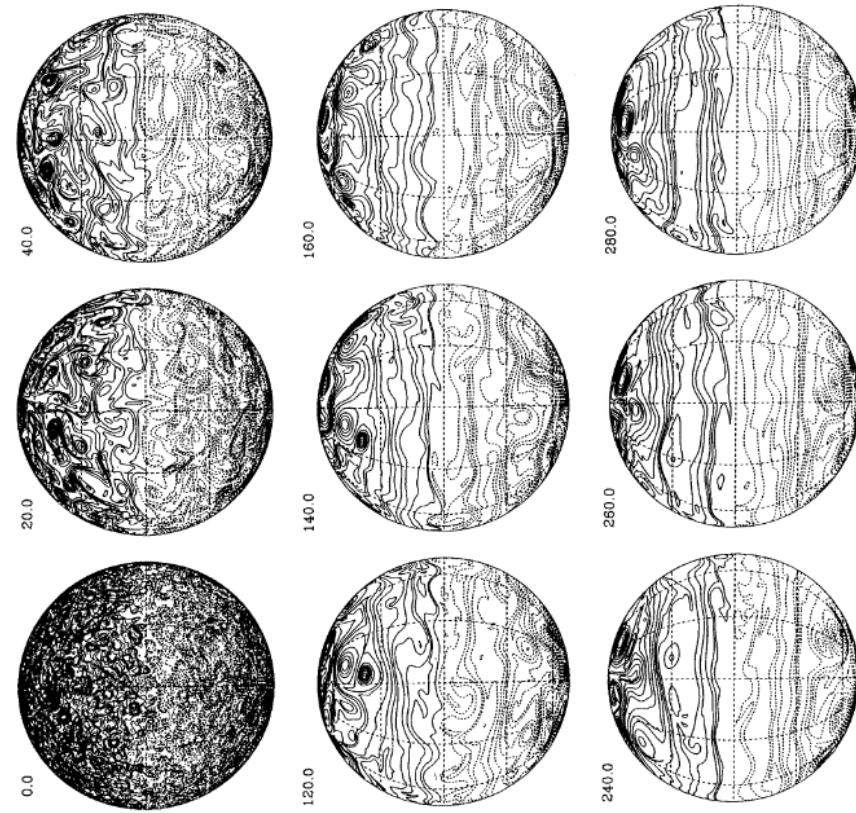
Figure 2.2 – *top* : Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune in-scale. *bottom*: Their respective latitude-wind speed graphic; from Showman et al. (2009).

The Rossby parameter is a good indicator to compare the gas giant of our Solar System; depending on the sign of  $\beta$ , the shallow layer produces retrograde-westward flow whilst full-sphere dynamics produces prograde-eastward jets. Figure 2.2 shows this, with Uranus and Neptune having an atmospherical dynamic dominated by westward flow and Jupiter and Saturn having their dominated by eastward flows.

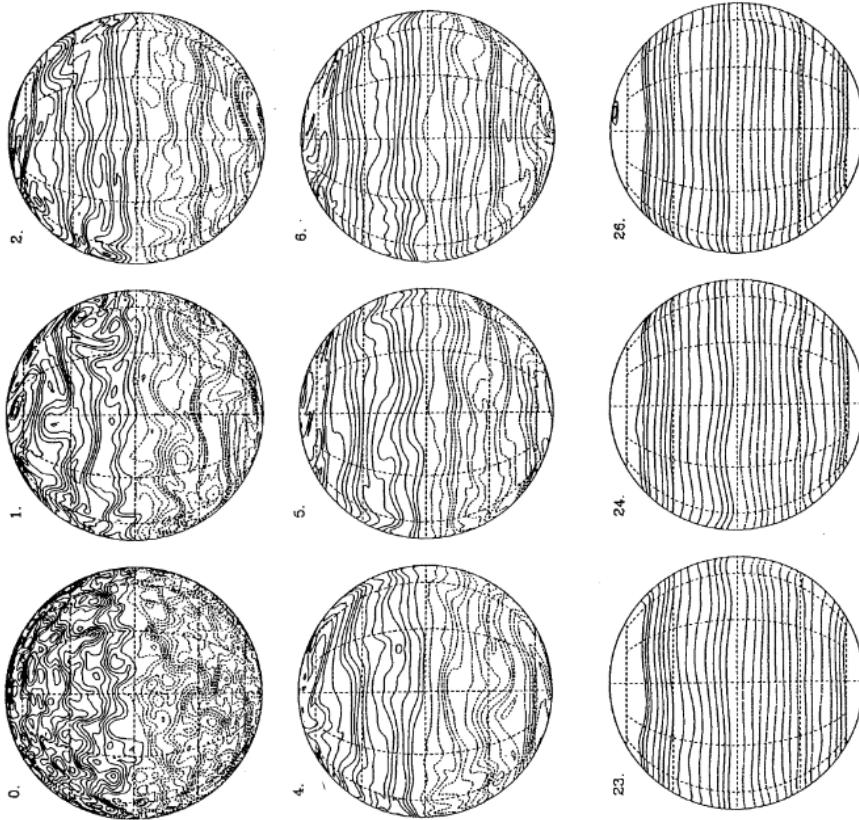
Multiple models concerning the formation of those jets exist (Vasavada et Showman, 2005; Showman et al., 2009): *Shallow water model*, *Two-dimensional non-divergent models* and *Multi layers models*, where the first two considers the cloud top of jovian atmosphere as an homogeneous and single layer, while the later one, like it's name suggests, considers a vertical structure made of multiple layers of different properties. It's worth mentioning that the *shallow water model*, the most used one, follows a length scale, the *Rossby radius of deformation* and expressed as :

$$L_D = \frac{\sqrt{gh}}{f} \quad (2.1)$$

With  $h$  the layer's thickness,  $g$  the gravitational pull and  $f$  the Coriolis force (with  $f = 2\Omega \sin(\phi)$ ,  $\phi$  being the latitude). This parameter does have a high importance in regards of the shallow water model. Computations done by Cho et Polvani (1996a,b) did shows that variations of that parameter influences the formation of jets while it's a finite value ( $\approx 2 \times 10^6$  m (Cho et Polvani, 1996a)); otherwise, in case of an infinite value of  $L_D$ , we don't have formation of jets. This is visible in figure 2.3.



(a) Modelisations of jovian *shallow water model* with a finite  $L_D$  parameter, with  $L_D = 2 \times 10^6$  m. The time constraints of this simulation was that t=1 correspond to one jovian day.



(b) Modelisations of jovian *shallow water model* with an infinite  $L_D$  parameter. The time constraints of this simulation was that t=1 correspond to 16 rotations of the sphere.

Figure 2.3 – Modelisations of jovian *shallow water model* with both finite and infinite  $L_D$  parameter from Cho et Polvani (1996a). The parameters are  $r_J = 7.2 \times 10^7$  m and  $\Omega = 1.8 \times 10^{-4}$  s $^{-1}$ , with  $r_J$  Jupiter's radius and  $\Omega$  Jupiter's angular rotation rate.

Moreover, such fluids like this one follows the shallow-water equations as (Cho et Polvani, 1996a):

$$\frac{\partial \nu}{\partial t} + \nu \cdot \nabla \nu + fk \times \nu = -g \nabla h \quad (2.2a)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (h\nu) = 0 \quad (2.2b)$$

with the same variables previously introduced and  $k$  being the normal vector to the surface of the planet.

This model by itself doesn't provide an absolute answer for formation of the jets, mainly because of it's lack of vertical structure. It does though provide a good framework to conceptualize and study the jovian atmospheric dynamics, thus explaining why it's very often used.

## 2.1.2 Deep winds

Wind speed tends to increase with depth, as shown by Atkinson et al. (1997). In correlation with pressure values shown in figure 1.1 and measurements in figure 2.4 using Galileo atmospheric probe, we can see that wind at the cloud tops (700 mbar) we have a speed of  $\approx 80$  to  $100$   $m.s^{-1}$  then a sudden increase of speed to reach  $\approx 170$   $m.s^{-1}$ , after what it stays nearly constant until the 21 bar limit of measurement of the probe.

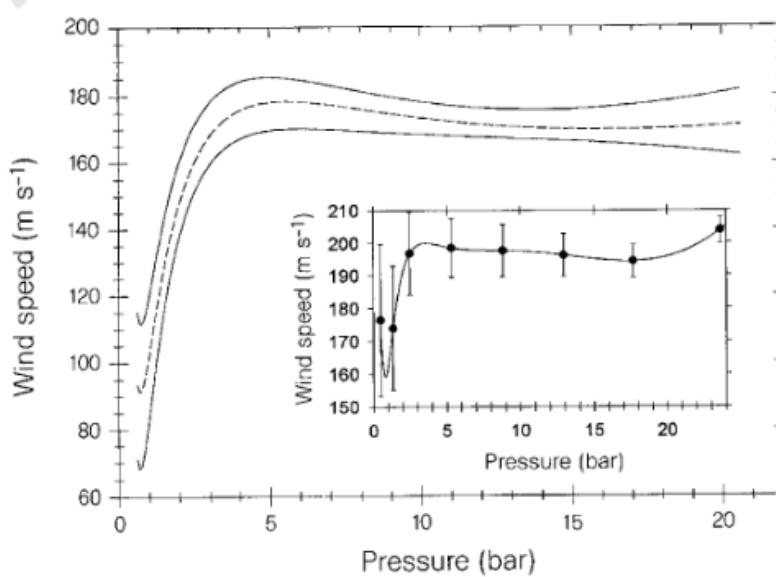


Figure 2.4 – Relation between wind speed and pressure from Atkinson et al. (1997).

This does have implications for deep winds dynamic. We can admit that jovian atmosphere is largely convective thus can be considered adiabatic (Vasavada et Showman, 2005), but also and more importantly barotropic (Vasavada et Showman, 2005; Showman et al., 2009; Atkinson et al., 1997). This barotropic states means that

the cylinder of rotation, for a fluid which rotate in a high speed, will rotate as a solid body, with the condition that the density is a function of the pressure only, *i.e* :

$$\rho = \rho(p) \quad (2.3a)$$

thus

$$\nabla p \times \nabla \rho = 0 \quad (2.3b)$$

However, this isn't the case in the whole range shown in figure 2.4; as shown by Atkinson et al. (1997), the density decrease by 0.5% per latitude in the 1-4 bar interval where zonal wind speed is increasing, meaning that the fluid isn't barotropic.

## 2.2 Cyclones and Anticyclones

In addition to zonal jets, Jupiter's atmosphere is characterized by multiple instances of vortex and vortices, present in different locations and different fashion. By definition, vortex are flow where the fluid particles are following a circular path centered on the same vertical axis (Joulié, 1998). As shown by Humphreys et Marcus (2007), cyclones and anticyclones appear on Jupiter at all latitudes  $> 15^\circ S$  from the equator; this is visible on figure 2.5. The dominance of the westward flows on the vortices is easily visible on the figure 2.6, with cyclones/anticyclones present on the southern hemisphere latitude belts. Their center are embedded in an average zonal shear  $\bar{\sigma}(y) = -d\bar{v}/dy$ , which is also cyclonic/anticyclonic.

These vortices drift toward east and west rather than north and south because of the planetary rotation presented before;  $\bar{v}(y)$  dominate the weather layer. However this doesn't mean that northern-southern drift don't have implication towards jovian vortices; Humphreys et Marcus (2007) shows that each vortex influences neighboring vortex in the same fashion as  $\bar{v}$ . They can move north and south, with a small variation of latitude  $\delta y$ , which can associate with the large shear and thus result in a large change in east-west vortex's velocity as

$$\delta\bar{v} \approx -\bar{\sigma}\delta y \quad (2.4)$$

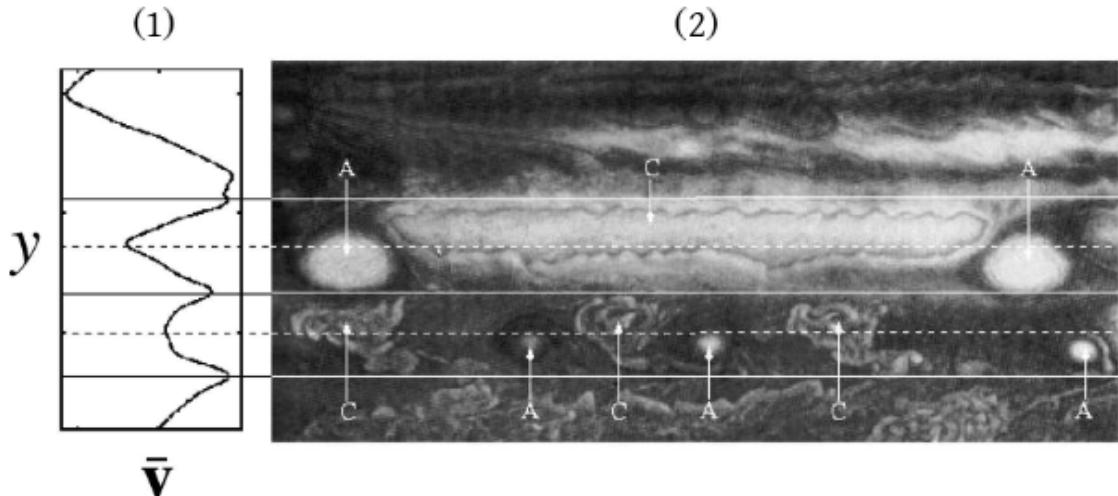


Figure 2.5 – (1) Zonal velocity  $\bar{v}$  in function of latitude. Considering that  $\lambda$  is the latitude, the maximum of the eastward flows (—) are  $\lambda_{Eastward-max} = 28^\circ, 36^\circ$  and  $44^\circ S$ ; for westward flows (---), the values are  $\lambda_{Westward-max} = 33^\circ$  and  $40^\circ S$ . (2) Voyager’s picture of cyclones and anticyclones. Interestingly enough, we can see that lines dominated by westward flows in (1), i.e  $33^\circ$  and  $40^\circ S$  present most of the cyclones/anticyclones. This is especially visible when looking at the center of the perturbations, C being the center of the cyclones and A being the center of the anticyclones, which are almost centered on the broken lines. Figures adapted from Humphreys et Marcus (2007).

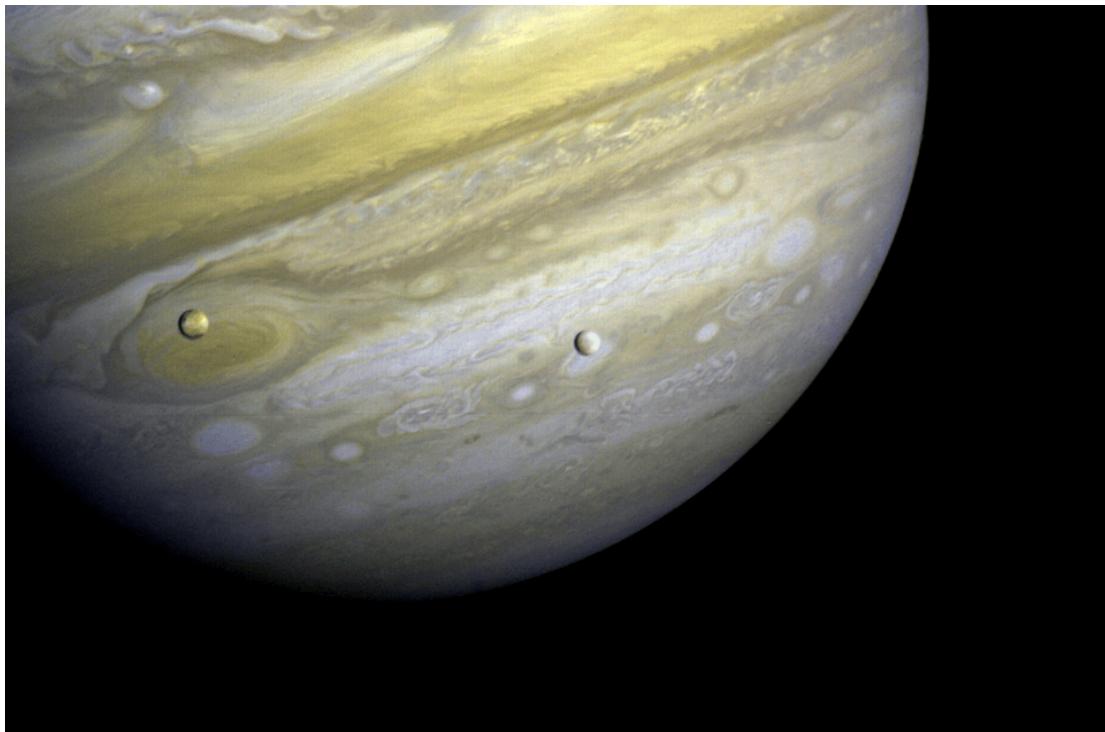


Figure 2.6 – Picture of Jupiter taken by Voyager 1 on February 13<sup>th</sup> 1979; two Galilean satellites, *Io* (left) and *Europa* (right), are visible. Concerning Jupiter most of the cyclones/anticyclones are present on the belts, which are as characterized as having westward flow (NASA/JPL).

### 2.2.1 Study of the *Great Red Spot*

The *Great Red Spot* is a huge anticyclonic storm located in the southern hemisphere of Jupiter that has been observed since the birth of modern optical observation of space ( $\approx 300$  years), and scientists have tried since to fully understand the mechanisms of that long lasting phenomena. While it still obeys to the same mechanisms described in section 2.2, the GRS carries unique properties and ways of behaving, thus making it interesting to study, especially when it comes to its longevity.

Overall anticyclonic movement of the winds of the GRS is put in evidence by wind velocity measurements, mainly thanks to Galileo's *Solid State Imaging* (SSI), which produced several image mosaics of the GRS in different spectral bands (Vasavada et al., 1998): 410, 756, 727 and 889 nm. An application of SSI's mosaics is figure 2.7, which depicts measurements made by Choi et al. (2007) of the GRS winds velocity using cloud tracking algorithms with the near-IR (756 nm) filter. This figure shows that the GRS presents a interesting structure; Sada et al. (1996) describe this structure by showing that the GRS is composed of 2 zones :

- an inner section, roughly elliptical and carrying a low velocity winds regime ( $5$  to  $10 \text{ m.s}^{-1}$ );
- a collar section surrounding the whole storm and carrying a high velocity wind regime, with velocities up to  $100 \text{ m.s}^{-1}$ ; Choi et al. (2007) indicates a maximum velocity of  $170 \text{ m.s}^{-1}$ . Most of the velocity and vorticity of the GRS is located in this zone (Marcus, 1993).

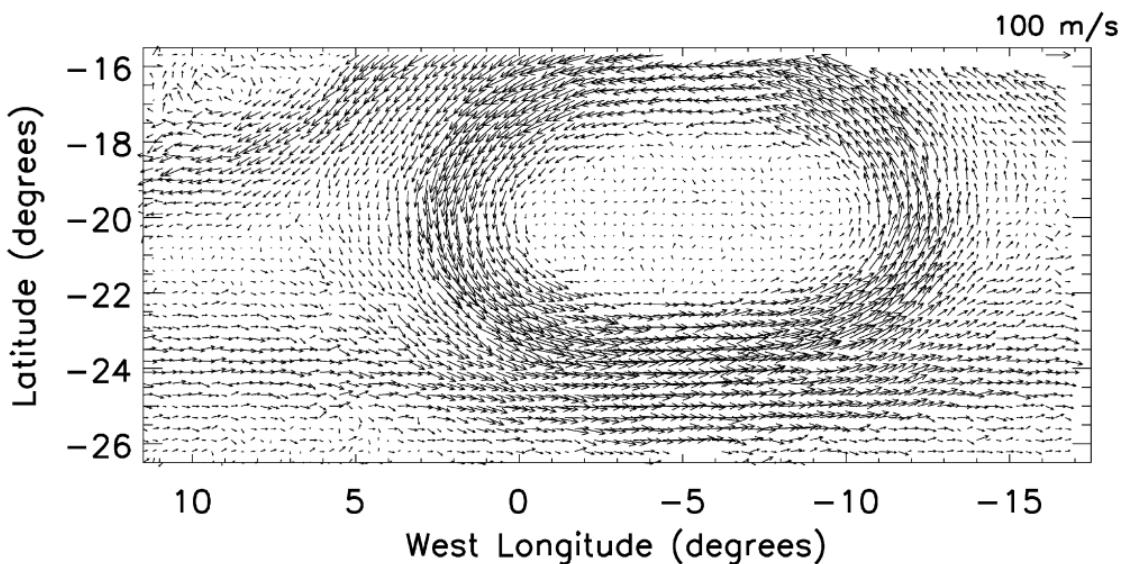


Figure 2.7 – Winds speed and direction of the GRS and its surrounding, from Choi et al. (2007); a scale vector is present in the upper-right corner.

While the winds are rather fast, we can see that the transition between those two regimes is also evolving very fast. The best example for this is the comparison between both Voyager spacecraft's encounter with Jupiter in 1979, 4 months

apart. Sada et al. (1996) presents a deep study of this through observation of the chemistry, colours and physical aspects of both encounters. Differences between Voyager 1 and 2 imaging of the GRS are visible on figure 2.8, with the collar having different colours and shape. However, one the interesting result of this study is that the inner region seems to be elevated over the collar; such physical manifestation can demonstrate the up-welling flow of material in the GRS.

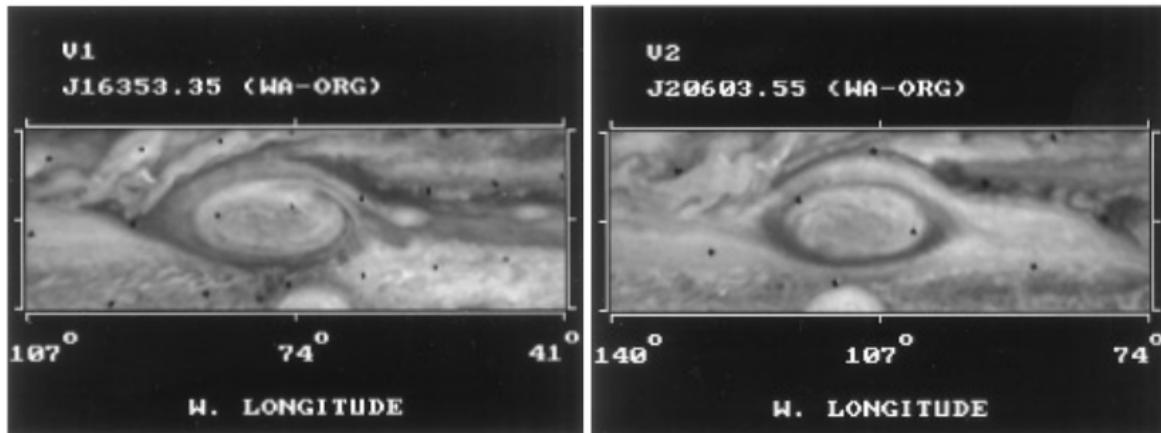


Figure 2.8 – Voyager 1 (left) and Voyager 2 (right) imaging of the *Great Red Spot*.  
Modified from Sada et al. (1996).

Knowing this, the next step is to do an in-depth study and try to understand the vertical structure of the GRS. One of the tool for this is the analysis of gravitational signal acquired by the Juno spacecraft. Thanks to that, Parisi et al. (2016) shows that the GRS may be deep rooted into Jupiter; approximately 2000 km deep and associated to a large mass.

Concerning the physical evolution of the *Great Red Spot*, estimations are fairly pessimists. We already talked about the color-wise evolution of the GRS in section 1.3.2 and how it became orange tinted instead of red, but physical evolution is also easily visible. The GRS is shrinking size-wise: Asay-Davis et al. (2009) indicate a diminution of size of almost 15% on a 20-year timescale. Currently, we are witnessing an all time low (Parisi et al., 2016; Simon et al., 2014). HST data from 2012 shows a longitude length of  $\approx 15.5^\circ$ , far from the  $\approx 21^\circ$  during Voyager's flyby ( $\approx 0.19^\circ/\text{year}$  of shrinking). The shrinking is even more important in some places, as shown by Simon et al. (2014) where the red edges of the storm appear at a size of  $\approx 14.1^\circ$ , which indicate a diminution of size of about  $\approx 1.4^\circ$ <sup>1</sup> in 21 months, a rate of shrinking 4 times greater than the usual evolution since 1979. Latitudinally speaking, we also observe an all time low with the current length being  $\approx 9.4^\circ$ , when it usually stand between  $10^\circ$  to  $11^\circ$ ; the shrinking can be estimated at  $0.04^\circ\text{year}^{-1}$ , with an increase during the 2012-2014 period with a rate of  $\approx 0.7^\circ\text{year}^{-1}$ . The slower rate of shrinking in the latitude length in comparison with the longitude one means that the GRS tend to have a circular shape rather than an oval shape. The overall fashion of shrinking is visible in figure 2.9.

1. 1760 km

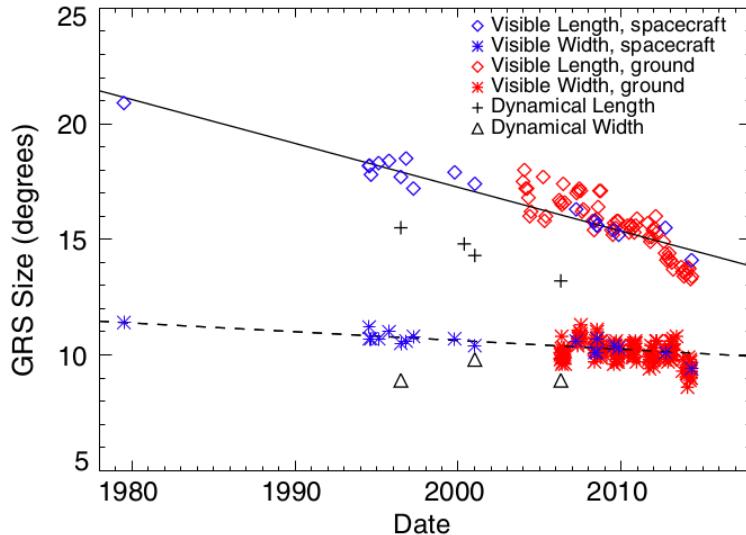


Figure 2.9 – Evolution of the size of the GRS, longitudinally and latitudinally-wise, from Simon et al. (2014). — indicates the longitude length and - - the latitude one.

In a general manner, Simon et al. (2014) explain this sudden shrinkage and color change of the GRS by changes in the zonal jet interactions. Northern and Southern jets surrounding the *Great Red Spot* shifted, thus leading to deflection and changes in the GRS shear environment.

Finally, the shrinking does affect wind speeds of the high velocity collar. Wong et al. (2021) indicate an increase of 4% to 8% for the 2009-2020 time period, whereas previous studies mainly based on older data didn't find any increase or decrease in this regard (Asay-Davis et al., 2009; Parisi et al., 2016).

## 2.2.2 Polar turbulences

Most of the observation of the poles were made by the Juno spacecraft, which has an 53-days polar orbit around Jupiter. Thanks to its multiple instruments, including the *Juno Cam* visible imaging device and *Jiram* 5- $\mu$ m infrared imaging device, scientists discovered interesting structure, as the poles aren't observable from Earth.

Jupiter poles are characterized by the presence of clusters of large scale storms. Both poles present these storm in similar - yet different - fashion: multiple cyclones gathered around a central cyclone at latitudes of  $\approx 84^\circ$  N/S (Gavriel et Kaspi, 2021).

As visible on figure 2.10, the Northern Polar Cyclone (NPC) is surrounded by 8 circumpolar cyclones (CPC). The NPC is only offset by  $0.5^\circ$  from the geographic north pole of Jupiter while 4 CPC are centered at latitude of about  $\approx 83.3^\circ$ N and  $\approx 82.5^\circ$ N for the last 4 remaining (Adriani et al., 2018). Size-wise, the NPC has a diameter of  $\approx 4000$  km and the CPCs size varies in an interval of 4000 to 4600 km.

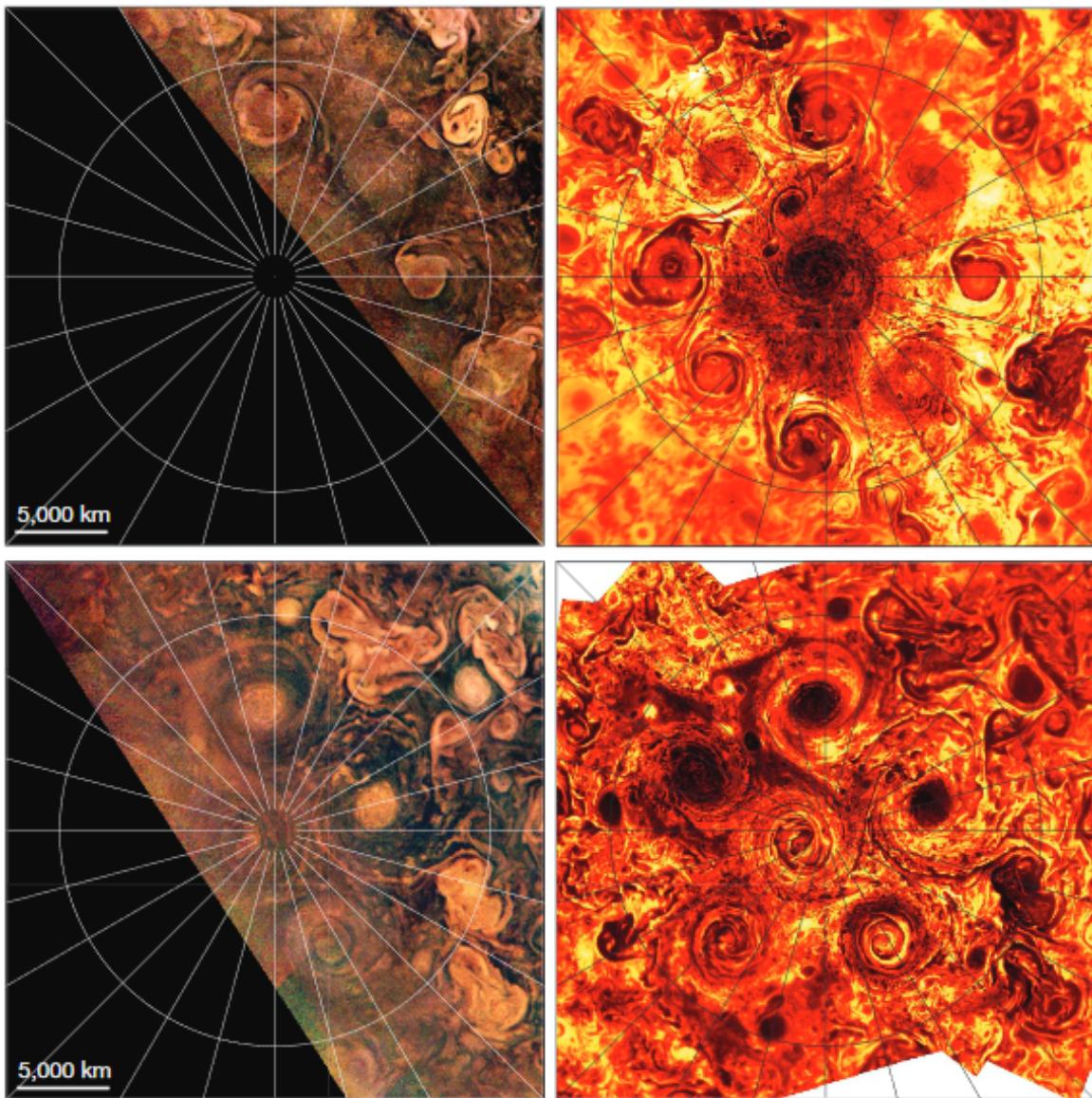


Figure 2.10 – North (*top*) and South (*bottom*) poles of Jupiter, taken by the Juno spacecraft on February 2<sup>nd</sup> 2017, with its *Juno Cam* visible imaging device (*left*) and its *Jiram* 5- $\mu$ m infrared imaging device (*right*). From Adriani et al. (2018).

When it comes to the south pole, the Southern Polar Cyclone (SPC) is surrounded by 5 CPCs, which sizes vary greatly: the interval here is 5600 to 7000 km. This increase in size is one of the main difference in comparison with the nothern pole, the other being the position of the cyclones. The SPC is offset by 1° to 2° from the geographic south pole of Jupiter, while the angular distance of the CPCs varies from 65° to 80° from the center of the SPC. This is less organized than in the north where all CPC groups have almost the same angular distance from the NPC's center.

When it comes to the tangent velocity of these storms, Adriani et al. (2018) observations show that they generally tend to approximate  $300 \text{ km.h}^{-1}$  ( $\approx 83 \text{ m.s}^{-1}$ ), with  $157 \text{ km.h}^{-1}$  being the slowest for a CPC located in the northern pole.

Such composition is referred to as a *Vortex Crystal*, described by Siegelman et al.

(2022) as "*a symmetric array of strong vortices in solid-body rotation within a background of weaker vorticity*". Such structures occur in what is called Polar Cap, the result of energy transfer in high jovian latitudes thanks to moist convection formed beneath the cloud level and rapid planetary rotation. While the geometry of the Polar Cap follows quasi-geostrophic dynamics, this phenomena occurs in the combination :

$$\gamma = \frac{f_p}{a_p^2} \quad (2.5)$$

with  $a_p$  the polar planetary radius and  $f_p$  the Coriolis parameter at the pole<sup>2</sup>. Speaking of which, near the poles the Coriolis parameter is :

$$f(r) \approx f_p - \frac{1}{2}\gamma r^2 \quad (2.6)$$

with  $r$  the distance from the pole. This equation, as written, suggests that  $\gamma$  is significant towards polar dynamic. Nonetheless, Adriani et al. (2018) shows that one of the main component in these type of structure might be the Coriolis  $\beta$ -effect, which shows that vortices tend to migrate toward the rotational pole, leading to alternating zonal flow.

Overall, the barotropic Polar Cap in quasi-geostrophic dynamics can be written as (Siegelman et al., 2022):

$$q_t + \psi_x q_y - \psi_y q_x = 0 \quad (2.7)$$

$$q = \zeta + \eta \quad (2.8)$$

with  $\psi(x, y, t)$  the stream function,  $\zeta = \psi_{xx} + \psi_{yy}$  the relative vorticity and  $q$  the potential vorticity.

Surprisingly enough, such structure seem to be stable in time; as indicated by Gavriel et Kaspi (2021), the clusters haven't change radically in their morphology for almost 2 years.

Observation of these cluster indicates that polar vortices on gas giants tend to be governed by barotropic dynamics (Gavriel et Kaspi, 2021), even though Jupiter is unique in how they behave compared to other interesting phenomenas in our solar system, such as Saturn's hexagonal storm. Nonetheless, CPCs will merge with their respective central storm in the future, but the reason behind their actual stability is still unknown to this day.

---

2. In terms of scale for the value, Siegelman et al. (2022) uses  $f_p = 3.5170 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  for their simulation, which in association with  $a_p = 6.6854 \times 10^4 \text{ km}$  gives a value of  $\gamma = 7.8690 \times 10^{-20} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

# Conclusion

Au delà des conclusions émises à la fin de chaque section, il est intéressant de conclure sur un aspect plus globale de l'étude de Jupiter. Géante gazeuse ayant été le plus visitée, que ce soit pour de simples *fly-by* (Pionneer 10 & 11, Voyager 1 & 2, Ulysses, Cassini et New Horizon) ou des orbites longues de plusieurs années (Galileo, Juno et les très prochaines missions JUICE (ESA) et Europa-Clipper (NASA)), Jupiter incarne la volonté de l'humanité dans sa conquête du savoir de ce qui nous entoure. L'état de l'art actuel nous permettent de voir à quel point ce corps est complexe et est encore apte à nous fournir de nombreux doutes et interrogations à son sujet.

En outre, bien que sa composition et sa chimie externe soient relativement bien comprise depuis la fin des années 1970, il subsiste encore une énorme part d'incompréhension quant à sa structure profonde ainsi que sur l'apparition de certains phénomènes vus lors de cette étude. Dès lors, on peut imaginer que les futures missions vers Jupiter (cf. JUICE et E-C) nous permettront d'obtenir des réponses et ainsi améliorer nos connaissances sur la planète la plus massive de notre système.

De nombreux points ont été omis lors de cette étude, de par la complexité du sujet et surtout par le manque d'enseignement de l'auteur<sup>3</sup> sur le sujet. Il est très certain que d'autres aspects influent fortement l'atmosphère jovienne, comme son système de lunes complexe et fourni (cf. la section 1.1 où l'influence de Io est discutée brièvement) ou l'impact des vents solaires sur la magnétosphère gargantuesque de Jupiter.

---

3. (Pour le moment!)



# Bibliographie et références

- Adriani, A., Mura, A., Orton, G., Hansen, C., Altieri, F., Moriconi, M., ... Amoroso, M. (2018). Clusters of cyclones encircling jupiter's poles. *Nature*, 555, 216-219. doi: [10.1038/nature25491](https://doi.org/10.1038/nature25491)
- Asay-Davis, X. S., Marcus, P. S., Wong, M. H., et de Pater, I. (2009). Jupiter's shrinking great red spot and steady oval ba : Velocity measurements with the 'advection corrected correlation image velocimetry' automated cloud-tracking method. *Icarus*, 203(1), 164-188. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2009.05.001>
- Atkinson, D. H., Ingersoll, A. P., et Seiff, A. (1997). Deep winds on jupiter as measured by the galileo probe. *Nature*, 388(6643), 649-650. doi: [10.1038/41718](https://doi.org/10.1038/41718)
- Atreya, S., Wong, A., Baines, K., Wong, M., et Owen, T. (2005). Jupiter's ammonia clouds—localized or ubiquitous ? , 53.
- Atreya, S. K., Wong, M. H., Owen, T. C., Niemann, H. B., et Mahaffy, P. R. (1998). Chemistry and clouds of jupiter's atmosphere : A galileo perspective. In C. Barbieri, J. H. Rahe, T. V. Johnson, et A. M. Sohus (Eds.), *The three galileos : The man, the spacecraft, the telescope : Proceedings of the conference held in padova, italy on january 7–10, 1997* (p. 249-260). Dordrecht : Springer Netherlands. doi: [10.1007/978-94-015-8790-7\\_21](https://doi.org/10.1007/978-94-015-8790-7_21)
- Baines, K., Sromovsky, L., Carlson, R., Momary, T., et Fry, P. (2019). The visual spectrum of jupiter's great red spot accurately modeled with aerosols produced by photolyzed ammonia reacting with acetylene. *Icarus*, 330, 217-229. doi: [10.1016/j.icarus.2019.04.008](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.04.008)
- Baines, K. H., Carlson, R. W., et Kamp, L. W. (2002). Fresh ammonia ice clouds in jupiter : I. spectroscopic identification, spatial distribution, and dynamical implications. *Icarus*, 159(1), 74-94. doi: <https://doi.org/10.1006/icar.2002.6901>
- Banfield, D., Gierasch, P., Bell, M., Ustinov, E., Ingersoll, A., Vasavada, A., ... Belton, M. (1998). Jupiter's cloud structure from galileo imaging data. *Icarus*, 135(1), 230-250. doi: <https://doi.org/10.1006/icar.1998.5985>
- Barrado-Izagirre, N., Rojas, J. F., Hueso, R., Sánchez-Lavega, A., Colas, F., Dauvergne, J. L., ... Team, IOPW (2013). Jupiter's zonal winds and their variability studied with small-size telescopes. *A&A*, 554, A74. Consulté sur <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321201> doi: [10.1051/0004-6361/201321201](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321201)
- Bhardwaj, A., et Gladstone, G. R. (2000). Auroral emissions of the giant planets. *Reviews of Geophysics*, 38(3), 295-353.

- Bhardwaj, A., et Michael, M. (2002). I0-jupiter system : A unique case of moon-planet interaction.  
[doi: 10.48550/ARXIV.ASTRO-PH/0209070](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0209070)
- Bjoraker, G. L., Wong, M. H., de Pater, I., Hewagama, T., Ádámkovics, M., et Orton, G. S. (2018). The Gas Composition and Deep Cloud Structure of Jupiter's Great Red Spot. , 156(3), 101. [doi: 10.3847/1538-3881/aad186](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aad186)
- Boissinot, A. (2021). *Modélisation de la dynamique atmosphérique de Jupiter* (Theses, Sorbonne Université). Consulté sur <https://theses.hal.science/tel-03469453>
- Braude, A. S., Irwin, P. G., Orton, G. S., et Fletcher, L. N. (2020). Colour and tropospheric cloud structure of jupiter from muse/vlt : Retrieving a universal chromophore. *Icarus*, 338, 113589. [doi: https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.113589](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.113589)
- Carlson, R., Bains, K., Anderson, M., Filacchione, G., et Simon, A. (2016). Chromophores from photolyzed ammonia reacting with acetylene : Application to jupiter's great red spot. *Icarus*, 274, 16-115.
- Cavalié, T., Feuchtgruber, H., Lellouch, E., de Val-Borro, M., Jarchow, C., Moreno, R.,... Sagawa, H. (2013). Spatial distribution of water in the stratosphere of jupiter from herschel hifi and pacs observations. *A&A*, 553, A21. [doi: 10.1051/0004-6361/201220797](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220797)
- Chanover, N., Kuehn, D., et Beebe, R. (1997). Vertical structure of jupiter's atmosphere at the galileo probe entry latitude. *Icarus*, 128(2), 294-305. [doi: https://doi.org/10.1006/icar.1997.5737](https://doi.org/10.1006/icar.1997.5737)
- Cho, J. Y. K., et Polvani, L. M. (1996a). The emergence of jets and vortices in freely evolving, shallow-water turbulence on a sphere. *Physics of Fluids*, 8(6), 1531-1552. [doi: 10.1063/1.868929](https://doi.org/10.1063/1.868929)
- Cho, J. Y. K., et Polvani, L. M. (1996b). The morphogenesis of Bands and Zonal Winds in the Atmospheres on the Giant Outer Planets. *Science*, 273(5273), 335–337.
- Choi, D. S., Banfield, D., Gierasch, P., et Showman, A. P. (2007). Velocity and vorticity measurements of jupiter's great red spot using automated cloud feature tracking. *Icarus*, 188(1), 35-46. [doi: https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.10.037](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.10.037)
- de Pater, I. (1986). Jupiter's zone-belt structure at radio wavelengths : II. comparison of observations with model atmosphere calculations. *Icarus*, 68(2), 344-365. [doi: https://doi.org/10.1016/0019-1035\(86\)90027-8](https://doi.org/10.1016/0019-1035(86)90027-8)
- Félix, S. (2023). Objectif jupiter. CRNS le Journal. Consulté sur <https://lejournal.cnrs.fr/articles/objectif-jupiter>
- Gastine, T., Wicht, J., Barik, A., et Duarte, L. (2023). MagIC - fluid dynamics in a spherical shell simulator. Consulté sur <https://magic-sph.github.io/>
- Gavriel, N., et Kaspi, Y. (2021). The number and location of jupiter's circumpolar cyclones explained by vorticity dynamics. *Nature Geoscience*, 14(8), 559-563. [doi: 10.1038/s41561-021-00781-6](https://doi.org/10.1038/s41561-021-00781-6)

- Guillot, T., Li, C., Bolton, S. J., Brown, S. T., Ingersoll, A. P., Janssen, M. A., ... Stevenson, D. J. (2020). Storms and the depletion of ammonia in jupiter : II. explaining the juno observations. *Journal of Geophysical Research : Planets*, 125(8), e2020JE006404. (e2020JE006404 10.1029/2020JE006404) doi: <https://doi.org/10.1029/2020JE006404>
- Guillot, T., Stevenson, D. J., Atreya, S. K., Bolton, S. J., et Becker, H. N. (2020). Storms and the depletion of ammonia in jupiter : I. microphysics of "mushballs". *Journal of Geophysical Research : Planets*, 125(8), e2020JE006403. (e2020JE006403 10.1029/2020JE006403) doi: <https://doi.org/10.1029/2020JE006403>
- Heimpel, M., Aurnou, J., et Wicht, J. (2005). Simulation of equatorial and high-latitude jets on jupiter in a deep convection model. *Nature*, 438, 193-6. doi: [10.1038/nature04208](https://doi.org/10.1038/nature04208)
- Hide, R. (1966). On the circulation of the atmospheres of jupiter and saturn. *Planetary and Space Science*, 14(8), 669-675. doi: [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(66\)90099-7](https://doi.org/10.1016/0032-0633(66)90099-7)
- Hueso, R., et Sánchez-Lavega, A. (2006). Moist convective storms in the atmospheres of jupiter and saturn. *The many scales in the universe : Jenam 2004 astrophysics reviews*, 6, 211.
- Humphreys, T. D., et Marcus, P. S. (2007). Vortex street dynamics : The selection mechanism for the areas and locations of jupiter's vortices. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 64, 1318-1333.
- Ibragimov, K. I., et Solodovnik, A. A. (1991). Ammonia hydrosulphide and cloudiness in the atmospheres of the giant planets. Кінематика и физика небесних тел, 7, 58-63.
- Ingersoll, A., Dowling, T., Gierasch, P., Orton, G., Read, R., Sánchez-Lavega, A., ... Vasavada, A. (2000). Dynamics of jupiter's atmosphere. *Jupiter. The Planet, Satellites and Magnetosphere*.
- Ingersoll, A. P., et Vasavada, A. R. (1998). Dynamics of jupiter's atmosphere. In J. Andersen (Ed.), *Highlights of astronomy : As presented at the xxiiird general assembly of the iau*, 1997 (pp. 1042–1049). Dordrecht : Springer Netherlands. doi: [10.1007/978-94-011-4778-1\\_134](https://doi.org/10.1007/978-94-011-4778-1_134)
- Joulié, R. (1998). *Mécanique des fluides appliquée*.
- Kaspi, Y., Galanti, E., Hubbard, W. B., Stevenson, D. J., Bolton, S. J., Iess, L., ... Wahl, S. M. (2018, 01). Jupiter's atmospheric jet streams extend thousands of kilometres deep. *Nature*, 555(7695), 223-226.
- Leverington, D. (2007). Chapter 3 - a history of solar system studies. In L.-A. McFadden, P. R. Weissman, et T. V. Johnson (Eds.), *Encyclopedia of the solar system (second edition)* (Second Edition éd., p. 53-70). San Diego : Academic Press. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-012088589-3/50007-4>

- Loeffler, M. J., et Hudson, R. L. (2018). Coloring jupiter's clouds : Radiolysis of ammonium hydrosulfide (nh4sh). *Icarus*, 302, 418-425. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.10.041>
- Loeffler, M. J., Hudson, R. L., Chanover, N. J., et Simon, A. A. (2015). Giant-planet chemistry : Ammonium hydrosulfide (nh4sh), its ir spectra and thermal and radiolytic stabilities. *Icarus*, 258, 181-191. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.06.015>
- Loeffler, M. J., Hudson, R. L., Chanover, N. J., et Simon, A. A. (2016). The spectrum of jupiter's great red spot : The case for ammonium hydrosulfide (nh4sh). *Icarus*, 271, 265-268. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.02.010>
- Marcus, P. S. (1993). Jupiter's Great Red Spot and other vortices. *araa*, 31, 523-573. doi: [10.1146/annurev.aa.31.090193.002515](https://doi.org/10.1146/annurev.aa.31.090193.002515)
- Moses, J. (2000). Photochemistry in giant-planet atmospheres. *From Giant Planets to Cool Stars, ASP Conference Series*, 212, 196-205.
- Moses, J., Fouchet, T., Bézard, B., Gladstone, G., Lellouch, E., et Feuchtgruber, H. (2005). Photochemistry and diffusion in jupiter's stratosphere : Constraints from iso observations and comparisons with other giant planets. *Journal of geophysical research*, 110. doi: [10.1029/2005JE002411](https://doi.org/10.1029/2005JE002411)
- Moses, J., Fouchet, T., Yelle, R., Friedson, A., Orton, G., Bézard, B., ... Livengood, T. (2000). The stratosphere of jupiter. *Jupiter. The Planet, Satellites and Magnetosphere*.
- Mura, A., Adriani, A., Connerney, J. E. P., Bolton, S., Altieri, F., Bagenal, F., ... Turrini, D. (2018). Juno observations of spot structures and a split tail in io-induced aurorae on jupiter. *Science*, 361(6404), 774-777. doi: [10.1126/science.aat1450](https://doi.org/10.1126/science.aat1450)
- Noll, K. S., McGrath, M. A., Trafton, L. M., Atreya, S. K., Caldwell, J. J., Weaver, H. A., ... Edgington, S. (1995). Hst spectroscopic observations of jupiter after the collision of comet shoemaker-levy 9. *Science*, 267(5202), 1307-1313. doi: [10.1126/science.7871428](https://doi.org/10.1126/science.7871428)
- Ordonez-Etxeberria, I., Hueso, R., Sánchez-Lavega, A., et Pérez-Hoyos, S. (2016). Spatial distribution of jovian clouds, hazes and colors from cassini iss multi-spectral images. *Icarus*, 267, 34-50. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.12.008>
- O'Neill, M., Emanuel, K., et Flierl, G. (2015). Polar vortex formation in giant-planet atmospheres due to moist convection. *Nature Geoscience*, 8, 523-526. doi: [10.1038/ngeo2459](https://doi.org/10.1038/ngeo2459)
- Parisi, M., Galanti, E., Finocchiaro, S., Iess, L., et Kaspi, Y. (2016). Probing the depth of jupiter's great red spot with the juno gravity experiment. *Icarus*, 267, 232-242. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.12.011>
- Park, J., Lee, J., Sim, K., Han, J. W., et Yi, W. (2008). Photodissociation of methane at lyman alpha (121.6 nm). *Bulletin of The Korean Chemical Society*, 29, 177-180.

- Parkinson, C., Griffioen, E., McConnell, J., Jaffel, L., Vidal-Madjar, A., Clarke, J., et Gladstone, G. (1999). Estimates of atomic deuterium abundance and lyman-alpha airglow in the thermosphere of jupiter. *Geophysical Research Letters*, 31, 1155. doi: [10.1029/1999GL003650](https://doi.org/10.1029/1999GL003650)
- Parkinson, C., McConnell, J. C., Jaffel, L., Lee, A. Y.-T., Yung, Y., et Griffioen, E. (2006, 01). Deuterium chemistry and airglow in the jovian thermosphere. *Icarus*, 183, 451-470. doi: [10.1016/j.icarus.2005.09.022](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2005.09.022)
- Pedlosky, J. (1987). *Geophysical fluid dynamics*. Springer New York. doi: [10.1007/978-1-4612-4650-3](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4650-3)
- Porco, C. C., West, R. A., McEwen, A., Genio, A. D. D., soll, A. P., Thomas, P., ... Vasavada, A. R. (2003). Cassini imaging of jupiter's atmosphere, satellites, and rings. *Science*, 299(5612), 1541-1547. doi: [10.1126/science.1079462](https://doi.org/10.1126/science.1079462)
- Ragent, B., Privette, C. A., Avrin, P., Waring, J. G., Carlston, C. E., Knight, T. C. D., et Martin, J. P. (1992). Galileo Probe Nephelometer experiment. , 60(1-4), 179-201. doi: [10.1007/BF00216854](https://doi.org/10.1007/BF00216854)
- Rensen, F., Miguel, Y., Zilinskas, M., Louca, A., Woitke, P., Helling, C., et Herbort, O. (2023). The deep atmospheric composition of jupiter from thermochemical calculations based on galileo and juno data. *Remote Sensing*, 15(3). doi: [10.3390/rs15030841](https://doi.org/10.3390/rs15030841)
- Rhines, P. (1975). Waves and turbulence on a beta-plane. *Journal of Fluid Mechanics*, 69, 417 - 443. doi: [10.1017/S0022112075001504](https://doi.org/10.1017/S0022112075001504)
- Sada, P. V., Beebe, R. F., et Conrath, B. J. (1996). Comparison of the structure and dynamics of jupiter's great red spot between the voyager 1 and 2 encounters. *Icarus*, 119(2), 311-335. doi: <https://doi.org/10.1006/icar.1996.0022>
- Salby, M. L. (1996). *Fundamentals of atmospheric physics : Volume 61*. San Diego, CA : Academic Press.
- Seiff, A., Kirk, D. B., Knight, T. C. D., Young, R. E., Mihalov, J. D., Young, L. A., ... Atkinson, D. (1998). Thermal structure of jupiter's atmosphere near the edge of a 5- $\mu\text{m}$  hot spot in the north equatorial belt. *Journal of Geophysical Research : Planets*, 103(E10), 22857-22889. doi: <https://doi.org/10.1029/98JE01766>
- Showman, A., Cho, J., et Menou, K. (2009). Atmospheric circulation of exoplanets.
- Siegelman, L., Young, W. R., et Ingersoll, A. P. (2022). Polar vortex crystals : Emergence and structure. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(17). doi: [10.1073/pnas.2120486119](https://doi.org/10.1073/pnas.2120486119)
- Simon, A., Wong, M., Rogers, J., Orton, G., Pater, I., Asay-Davis, X., ... Marcus, P. (2014). Dramatic change in jupiter's great red spot from spacecraft observations. *The Astrophysical Journal*, 797, L31. doi: [10.1088/2041-8205/797/2/L31](https://doi.org/10.1088/2041-8205/797/2/L31)
- Sromovsky, L., Baines, K., Fry, P., et Carlson, R. (2017). A possibly universal red chromophore for modeling color variations on jupiter. *Icarus*, 291, 232-244. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.12.014>

- Strobel, D. F. (1969). The photochemistry of methane in the jovian atmosphere. *Journal of the atmospheric sciences*, 26, 906-911.
- Tomasko, M. G., et Smith, P. H. (1988). Physical Models of the Haze in Jupiter's Stratosphere and Upper Troposphere. In *Bulletin of the american astronomical society* (Vol. 20, p. 871).
- Tony Knight. (1996). *Galileo probe asi raw data archive*. NASA Planetary Data System. Consulté sur <https://pds.nasa.gov/ds-view/pds/viewDataset.jsp?dsid=gp-j-asi-3-entry-v1.0> doi: 10.17189/TFSA-PB91
- Vallis, G. (2018). *Fluid Dynamics of the Atmosphere and Ocean* (ECMM719). Consulté sur <https://empslocal.ex.ac.uk/people/staff/gv219/ecmm719/ess-ecmm719.pdf>
- Vasavada, A. R., Ingersoll, A. P., Banfield, D., Bell, M., Gierasch, P. J., Belton, M. J., ... Senske, D. A. (1998). Galileo imaging of jupiter's atmosphere : The great red spot, equatorial region, and white ovals. *Icarus*, 135(1), 265-275. doi: <https://doi.org/10.1006/icar.1998.5984>
- Vasavada, A. R., et Showman, A. P. (2005). Jovian atmospheric dynamics : an update after galileo and cassini. *Reports on Progress in Physics*, 68(8), 1935. doi: [10.1088/0034-4885/68/8/R06](https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/8/R06)
- Wang, D., Lunine, J. I., et Mousis, O. (2016). Modeling the disequilibrium species for jupiter and saturn : Implications for juno and saturn entry probe. *Icarus*, 276, 21-38. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.04.027>
- West, R., Baines, K., Friedson, A., Banfield, D., Ragent, B., et Taylor, F. (2004). *Jovian clouds and haze*.
- Wicht, J., et Gastine, T. (2020). Numerical simulations help revealing the dynamics underneath the clouds of jupiter. *Nature Communications*, 11(1), 2886. doi: [10.1038/s41467-020-16680-0](https://doi.org/10.1038/s41467-020-16680-0)
- Wong, M. H., Bjoraker, G. L., Smith, M. D., Flasar, F. M., et Nixon, C. A. (2004). Identification of the 10- $\mu\text{m}$  ammonia ice feature on jupiter. *Planetary and Space Science*, 52, 385-395.
- Wong, M. H., Marcus, P. S., Simon, A. A., de Pater, I., Tollefson, J. W., et Asay-Davis, X. (2021). Evolution of the horizontal winds in jupiter's great red spot from one jovian year of hst/wfc3 maps. *Geophysical Research Letters*, 48(18), e2021GL093982. (e2021GL093982 2021GL093982) doi: <https://doi.org/10.1029/2021GL093982>
- Yair, Y., Levin, Z., et Tzivion, S. (1992). Water—cumulus in jupiter's atmosphere : Numerical experiments with an axisymmetric cloud model. *Icarus*, 98(1), 72-81. doi: [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(92\)90208-O](https://doi.org/10.1016/0019-1035(92)90208-O)
- Yelle, R. V., et Miller, S. (2004). Jupiter's thermosphere and ionosphere. In F. Bagenal, T. E. Dowling, et W. B. McKinnon (Eds.), *Jupiter. the planet, satellites and magnetosphere* (Vol. 1, p. 185-218).