

D.U SCIENCE DE L'UNIVERS

« COMMENT SE FORMENT LES PARTICULES SOLIDES DE BRUMES ORGANIQUES DANS LES ATMOSPHÈRES D'AZOTE (N₂) & MÉTHANE (CH₄) DU SYSTÈME SOLAIRE ET AU-DELÀ ? »



Survole de Cassini au-dessus de Titan.

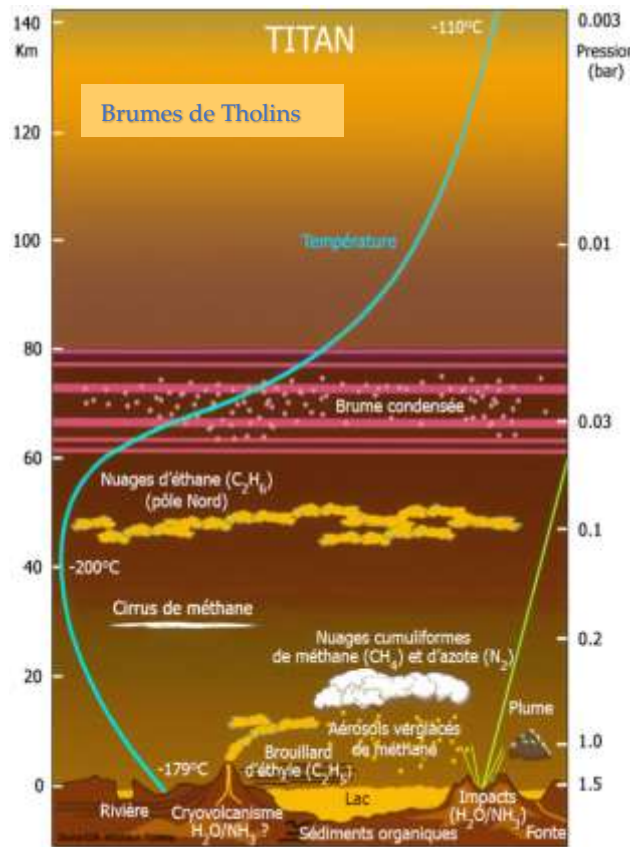


Image extraite The European Space Agency (ESA)



Source : Pierre Thomas Titan en orbite autour de saturne.

Mémoire bibliographique rédigé
Par M. Calixte Joseph
SOUS LA DIRECTION DU PROFESSEUR
BERTRAND TANGUY
ANNÉE 2024-2025.

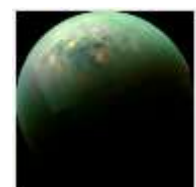


Image de Titan capturée par la sonde Cassini en 2014. (Source Science Nasa)

INTRODUCTION :

POURQUOI S'INTERESSE T-ON AUX BRUMES ORGANIQUES ?

Parmi tous les satellites connus du système solaire, seul Titan a une atmosphère épaisse avec de l'azote comme principal constituant. Cela fait de Titan ainsi que de la Terre, Triton et de Pluton les seuls corps du système solaire avec une atmosphère dotée majoritairement d'azote moléculaire N_2 . (Voir le tableau récapitulatif de ces corps azotés en annexe : document 1)

En dehors de ces lunes et de Pluton, seule l'atmosphère terrestre est en plus dominée par l'azote qui provient probablement de météorites chondritiques (Marty 2012 ; Harries et al., 2015). L'étude atmosphérique de ces corps requièrent plusieurs techniques soit depuis la Terre à l'aide de télescopes ou soit par des mesures in-situ obtenues à l'aide de sondes spatiales. Ces observations sont par la suite complétées par des travaux de modélisation numériques ou expériences en laboratoire. Les études qui y sont menées, ont montré qu'il était possible de dégager des informations très intéressantes sur l'histoire de ces corps azotés du système solaire. Autrement dit, il est possible de déduire d'importantes informations sur les différents processus qui affectent le diazote (N_2) et le méthane (CH_4) qui y sont présents, tel est le cas sur Titan.

Par ailleurs, il est montré qu'à l'époque de sa formation, la Terre avait probablement une atmosphère similaire à celle de Titan. On pense que les brumes visibles sur Titan ressemblent aux couches d'aérosols terrestres avant que la vie ne se soit développée sur Terre, il y a plus de 3,8 milliards d'années (Raulin 2008). Il est probable qu'il y ait eu des brumes organiques solides susceptibles de provoquer la formation de molécules non vivantes, lesquelles par la suite auraient favorisé la formation de molécules du vivant constituées de carbone (C), azote (N), hydrogène (H), oxygène (O) et phosphore (P). Cela nous amène donc à nous demander et à imaginer :

- Comment de telles atmosphères sont - elles capables d'arriver à produire une chimie aussi complexe ?
- Comment les brumes organiques types aérosols se sont-elles formées ?
- Quels sont leurs impacts sur le climat et sur l'atmosphère de Titan ?
- Quelles sont les principaux processus de formation et de fractionnements des molécules dans ces atmosphères ?

De nombreux travaux montrent que les fractionnements et les formations de molécules seraient dû par exemple à des processus photochimiques tels que la photodissociation de l'azote moléculaire ou photolyse du méthane (Liang et al., 2007 ; Krasnopolsky 2016).

Tous ces processus doivent être pris en compte pour mieux comprendre l'évolution des atmosphères dominées par l'azote comme Titan ou la Terre.

CONTEXTE GÉNÉRAL ET OBJECTIFS :

L'atmosphère de Titan, pourrait- elle constituer un laboratoire de formation de molécules prébiotiques c'est-à-dire être à l'origine de la vie ?

Une telle question correspond à un domaine de la science en lien avec l'exobiologie ou astrobiologie.

- Qu'est-ce donc l'exobiologie ou astrobiologie ?

De façon générale, c'est une science qui a pour objectif l'étude de la vie dans l'univers. Plus précisément, elle inclut l'étude des conditions et des processus qui ont permis l'émergence du vivant sur notre planète, l'étude de l'évolution de la matière organique vers des structures complexes dans l'univers.

- Que sont les facteurs abiotiques ?

Ce sont des facteurs non vivants. Il s'agit d'une approche scientifique qui suppose que les molécules organiques pourraient être formées à partir de composés inorganiques par des réactions chimiques spontanées.

Dans ce concept, on cherche à déterminer quelles sont les réactions chimiques et les phénomènes physiques qui sont impliqués dans la synthèse abiotique. Par ailleurs les réactions chimiques dépendent en générale des environnements dans lesquels elles se produisent. Par exemple, dans notre cas, il s'agit de milieux très particuliers avec des paramètres physico-chimiques *tels que la pression, la température, rayonnement solaire ou rayons cosmiques* qui forcément vont avoir un rôle déterminant dans le déroulement des réactions physicochimiques, ainsi que la nature des produits formés.

Ainsi, l'idée est de comprendre les réactions chimiques qui se produisent dans ces conditions extrêmes de basses températures et de pression. On espère alors réussir à comprendre la formation des brumes organiques solides (aérosols ou Tholins¹) dans les atmosphères constituées de méthane (CH₄) et de diazote (N₂) ainsi que leurs propriétés physicochimiques. Les études menées par des simulations numériques et expérimentales en laboratoire visent à comprendre particulièrement les processus chimiques impliquant des espèces réactives telles que les radicaux libres et des espèces organiques oxydées à partir de la photolyse et dissociation UV dans les atmosphères de lunes telles que Titan.

Dans notre travail bibliographique, nous nous focaliserons essentiellement sur la plus grosse lune de Saturne à savoir Titan qui a fait l'objet de plusieurs missions spatiales (*de Voyager 1 et 2 à de très grande mission comme Cassini-Huygens (2005-2017)*). En effet Titan est prise comme objet d'étude pour le climat afin de tenter de comprendre les processus dynamiques concernant les flux ou les quantités de méthane, les vents, les brumes organiques ou aérosols qui s'y produisent. Ainsi faire une exploration de Titan à pour but de comprendre aussi les phénomènes qui n'existent peut-être pas sur Terre.

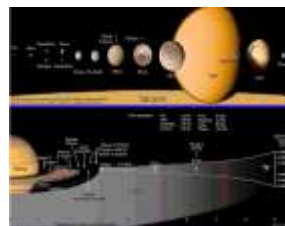


Figure II-1. Les Lunes de Saturnes : source Nasa.

¹ Tholins : ce sont des matières organiques rouges-orangées ou brumes dont le nom a été proposé par Carl Sagan et ses collègues en 1990 pour qualifier cette matière inconnue sur Terre.

OBJECTIFS DÉTAILLÉS :

Ce mémoire vise à présenter et à analyser, sous un angle chimique, les molécules susceptibles de se former spontanément et qui pourraient de fait expliquer les concentrations ou les taux observés dans l'atmosphère de Titan. Ainsi, quelles sont les étapes physico-chimiques menant à la formation de brumes organiques solides à partir d'une atmosphère initiale composée de $\{N_2 + CH_4\}$, et est-il envisageable de créer des analogues de ces processus en laboratoire ?

Notre travail sera alors scindé en plusieurs chapitres.

- **Le premier chapitre** sera consacré à une présentation succincte de différentes lunes et planètes naines du système solaire tels que Triton, Pluton et Titan. Plus précisément, l'idée sera de mettre en exergue les caractéristiques communes que présentent leurs atmosphères. Nous nous appuierons sur les différentes missions spatiales historiques que les chercheurs et astronomes leur ont consacrés.
- **Le deuxième chapitre** sera particulièrement dédié à l'atmosphère de Titan c'est-à-dire à sa composition chimique, aux méthodes et aux techniques de détection. Nous porterons tout particulièrement notre attention sur la mission Cassini-Huygens, qui a grandement contribué à la détection et à l'identification des espèces chimiques organiques dans les différentes couches de l'atmosphère de Titan. Il s'agira d'une approche par mission.
- **Le troisième chapitre** sera consacré à la chimie observée et les conditions liées aux processus photochimiques UV à l'origine des molécules organiques. Nous présenterons quelques modèles de mécanismes réactionnels de molécules simples qui pourraient être à l'origine de cet inventaire complexe. Nous présenterons ensuite une méthode qui vise à relier le modèle théorique de la microphysique des aérosols au cas de Titan. Puis nous comparerons les résultats prédits par cette théorie avec ceux prédits par les simulations numériques. Tout ceci dans le but de mieux appréhender la manière dont ces briques de matière contribuent à la formation de brumes organiques solides.
- **Le quatrième chapitre** sera consacré à la production des analogues d'aérosols (Tholins) sur Titan. Notre démarche scientifique consistera à exposer les expériences effectuées aux laboratoires pour tenter de reproduire les analogues d'aérosols organiques types Tholins. Dans cette optique, nous mettrons en avant l'expérience « Pampre » du laboratoire LATMOS qui tente de reproduire divers processus réactionnels de l'atmosphère de Titan dont les composés organiques complexes appelés « Tholins », qui semblent être issue de différentes réactions de photolyse ou de la radiolyse de mélanges de diazote et de méthane : $\{N_2/CH_4\}$. Nous discuterons aussi de la pertinence de ces analogues obtenus en labo avec ceux caractérisés par les instruments de Cassini-Huygens lors de l'exploration de l'atmosphère de Titan.

SOMMAIRE :

Chapitre 1 : PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTES CORPS AZOTÉS DU SYSTÈME SOLAIRE.

I- TRITON : « LUNE DE NEPTUNE ».	6
II- PLUTON : « PLANÈTE NAIN À LA LIMITE DU SYSTÈME SOLAIRE ».	7
III- TITAN ET LA TERRE PRIMITIVE	8

Chapitre 2 : LES DÉTECTIONS DES MOLÉCULES DANS L'ATMOSPHÈRE DE TITAN.

I- EXPLORATION DE TITAN	11
1- Les missions de Voyager 1 et 2 (1980-1982).	11
2- La mission Cassini (2004-2017).	12
II- QUELLES TECHNIQUES ET MÉTHODES ONT PERMIS DE DÉTECTER AUTANT DE MOLÉCULES DANS L'ATMOSPHÈRE DE TITAN ?	15
1- Méthodes d'occultations par ondes radios	15
2- La spectrométrie de masse et son principe.	16
3- Les résultats et conclusions des premières observations faites par la sonde Pioneer 11 et les sondes Voyager 1 et 2.	17
4- Les observations in situ faites par DISR.	18

Chapitre 3 : UNE CHIMIE COMPLEXE DANS L'ATMOSPHÈRE DE TITAN.

I- MODÈLE PHOTOCHEMIQUE DE L'IONOSPHERIQUE, MÉSOSPHERE ET TROPOSPHERE EN PHASE GAZEUSE	19
1- Comment se forment les molécules les plus simples dans l'atmosphère de Titan ?	19
2- La formation de molécules plus complexes : Exemple du Benzène.	26
II- QUE NOUS DISENT LES MODÈLES DE SPECTRES DE MASSE PAR RAPPORT AUX MOLÉCULES DÉTECTÉES ?	27
III- EN CONCLUSION : QUE NOUS DISENT LES MODÈLES PHOTOCHEMQUES ?	28
IV- LES MODÈLES PHYSICO-CHEMQUES DE FORMATION D'AÉROSOLS	30

Chapitre 4 : COMMENT REPRODUIRE DES ANALOGUES D'AÉROSOLS DE TITAN ? ... 40

I- POURQUOI LA SIMULATION EXPÉRIMENTALE ?	41
II- SIMULATION EXPÉRIMENTALE AU MOYEN DU DISPOSITIF PLASMA RADIO-FRÉQUENCE PAMPRE AU LATMOS.	42
III- COMMENT VALIDER LES ANALOGUES « THOLINS » PRODUITS PAR L'EXPÉRIENCE PAMPRE ?	47
➤ Conclusion :	48

CONCLUSION GÉNÉRALE :	49
REMERCIEMENTS :	50
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.	50
ANNEXES.	52

CHAPITRE I : *Les atmosphères azotées des corps du système solaire : Titan, Pluton, Triton et la Terre.*

I- TRITON : « LUNE DE NEPTUNE ».

➤ Introduction :



Figure.1 (Chap I-1). (Source Wikipédia) Triton par Voyager 2 le 24 août 1989 en fausses couleurs.

Triton a été découvert par l'astronome britannique William Lassell le 10 octobre 1846 soit 17 jours à peine après la découverte de Neptune par les astronomes allemands Johann Gottfried Galle et Heinrich Louis d'Arrest, à partir des coordonnées calculées par l'astronome et mathématicien français Urbain Le Verrier. Triton est orbite autour de la planète dans le sens rétrograde (orbite dans le sens inverse de la rotation de Neptune). Selon toute vraisemblance, Triton est un objet de la ceinture de Kuiper qui a été piégé dans le champ gravitationnel de Neptune au début de l'histoire du système solaire. (T.Bertrand et al (2024) ; W. B. McKinnon(1984))

➤ Présentation succincte de son atmosphère.

Il est vrai que l'origine et l'évolution des atmosphères azotées de Pluton et de Triton restent encore incertaines, toutefois il est fort probable que ces atmosphères proviennent soit de la nébuleuse protosolaire ou soit des comètes. Des surfaces de glaces (N_2 , CH_4 et CO) assez volatils se sont formées et seraient en partie à l'origine de son atmosphère azotée. (T.Bertrand et al (2024)). Triton est entouré d'une atmosphère très ténue (1Pa) mais étendue. Elle est principalement constituée d'azote moléculaire (N_2) avec des traces de monoxyde de carbone (CO), de méthane (CH_4). On pense que de l'hydrogène moléculaire (H_2) et atomique H^\bullet sont également présents dans la haute atmosphère en quantités significatives. Ces dernières résulteraient vraisemblablement de la photolyse du méthane par les rayons ultraviolets du rayonnement solaire. Son atmosphère se compose de 4 couches découpées de la sorte : **la troposphère ; la thermosphère, l'ionosphère et exosphère.**

Typiquement la troposphère s'étend depuis la surface jusqu'à une altitude d'environ 8 km. Elle est créée par des turbulences présentes à la surface. Elle est parcourue par une brume d'aérosols composés d'hydrocarbures (C_xH_y) et de nitriles ($R-CN$) formés par l'action des ultraviolets du rayonnement solaire sur les molécules de méthane et d'azote présentes dans l'atmosphère de Triton.

II- PLUTON :

Pluton a été découverte en 1930 par l'astronome américain Clyde Tombaugh et avait été considéré comme la 9^{ème} planète du système solaire avant d'être déclassé lors du 26^{ème} congrès de l'Union

Internationale d'Astronomie (UAI) qui s'est tenu le 24 août 2006. Pluton est toutefois pour les planétologues, une planète naine située à la périphérie du système solaire, au-delà de l'orbite de Neptune.



Source NASA / Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory.:

Figure.2. (Chap I) -II Image de Pluton en haute définition le 14 juillet 2015.

➤ COMMENT A-T-ON DÉCOUVERT L'ATMOSPHÈRE DE PLUTON ?

L'atmosphère azotée de Pluton a été détectée pour la première fois par l'empreinte laissée sur la courbe de lumière d'une étoile qui a été occultée par la planète en 1985, et confirmée par une autre occultation en 1988.

➤ Par occultation :

C'est un phénomène qui se produit lorsqu'un corps passe devant une étoile, cette étoile d'arrière-plan disparaît de manière brutale ; dans le cas de Pluton, la luminosité de l'étoile masquée a graduellement diminué. Les étoiles qui ont été occultées par Pluton le 20 juillet 2002 et le 21 août 2002 sont appelées (P126) et (P131.1) respectivement. Ces deux occultations ont été observées à des différents endroits. Un exemple de courbes de lumière obtenues par le télescope de Chili et celui du TCFH à Hawaï est donné en annexe. *(Pour plus détail, nous invitons le lecteur à se rendre à l'annexe Chap I- document 2 un extrait de B. Sicardi publié en juillet 2003).*

Lors du survol de Pluton, la sonde New-Horizons a détecté la présence de couches de brumes dans l'atmosphère de Pluton.



Photo NASA JHUAPL/SwRI



Figure.3 (Chap I)-II. Rencontre de la sonde New Horizon avec Pluton. Elle était alors à 12 500 km de la surface de la planète naine en juillet 2015.

➤ QUE SAVONS-NOUS DE L'ATMOSPHÈRE DE PLUTON ?

Tout comme Triton, Pluton possède une atmosphère très tenue en azote et par conséquent difficilement sondable. En raison de la faible gravité de Pluton, son atmosphère s'étend sur une altitude bien plus importante que celle de notre planète. Elle n'est détectable depuis la Terre que par certains instruments (spectromètres, spectrographe...) ou par des méthodes indirectes d'occultations stellaires. En 1993, *Tobias C.Owen* et ses collègues sont parvenus à identifier les espèces chimiques contenues dans l'atmosphère de Pluton grâce à l'obtention de spectres infra rouge (1,2 μm à 2,4 μm). Puis vers les années 2015, grâce à la sonde New horizons de nouvelles preuves d'existence de l'atmosphère de Pluton ont été révélées. Ainsi grâce aux méthodes de spectrométrie infrarouge et de polarisation de la lumière, il est montré que

L'atmosphère de Pluton est composée de 99,5% de diazote (N_2), 0,5 % de méthane (CH_4) et des traces de monoxyde et dioxyde de carbone ainsi que d'ammoniac.

Y A-T-IL UNE CHIMIE POSSIBLE DANS L'ATMOSPHÈRE DE PLUTON ?

De la photochimie a été suggéré dans l'atmosphère de Pluton à l'aide d'un modèle pour une atmosphère hydrodynamique par *Krasnopolsky [1999]*. D'après cette étude, en raison de son atmosphère riche en méthane, la photochimie de Pluton est très probablement plus similaire à celle de Titan qu'à celle de Triton. Il semblerait que sur Triton, la photo-ionisation et électro-ionisation de N_2 en N_2^+ ou en N^+ peuvent conduire à la production d'azote atomique ou à l'ion N_2H^+ .

Les produits photochimiques les plus abondants dans ce cas seraient le C_2H_2 , C_4H_2 , HCN, H_2 , C_2H_4 , SC_3N , C_2H_6 , C_3H_2 et C_3H_4 . De plus en dehors du parent N_2-CH_4 , il est montré que les molécules de CO absorbent les photons de longueurs d'onde $\lambda < 145$ nm, et que les produits formés absorbent presque complètement les photons de longueurs d'onde $\lambda < 185$ nm.

D'après *Swain (2009)* et *Madhusudhan et Seager (2009)*, en dehors de N_2/CH_4 la molécule de CO a été détectée dans l'atmosphère de planètes extrasolaires. Des expériences ont ainsi été mises en place pour tenter de savoir si la molécule CO pourrait jouer un rôle dans la formation des brumes atmosphériques planétaires. (*Hörst et Tolbert (2013)*)

III- TITAN ET LA TERRE PRIMITIVE.

1. Présentation succincte de Titan.

Tout d'abord Titan est le sixième satellite de la planète gazeuse « Saturne ». Il fut découvert par l'astronome hollandais Christiaan Huygens, le 25 mars 1655. Ce n'est qu'en 1847 que John Herschel fils du célèbre astronome-physicien William Herschel (découvreur de Mimas et d'Encelade en 1789), proposa de désigner les différents satellites de Saturne « des Titans ». Et c'est ainsi que le plus brillant d'entre eux hérita du nom « Titan ». Il a un diamètre de 5150 km. C'est un satellite constitué d'un mélange de glaces (H_2O) et de silicates + fer (densité de 1,9). (Pierre Thomas 2004)

Titan est sans doute l'unique satellite du système solaire qui possède une atmosphère aussi massive et opaque. Cela a rendu l'observation de sa surface quasi impossible.

En effet, tout comme sur Venus, la surface de Titan est restée inaccessible aux astronomes en raison de l'opacité de son atmosphère dans le domaine du visible. Grâce à la mission Cassini-Huygens, la sonde européenne Huygens a pu pénétrer dans l'atmosphère de Titan et a collecté de nombreuses données importantes sur la nature de cette atmosphère.

2. L'atmosphère comparée à la Terre Primitive :

➤ Terre Primitive

L'atmosphère de la terre primitive correspond à l'atmosphère qui résultait du début de l'histoire de la Terre il y a environ 4,6 milliards d'années à partir de la poussière et des gaz

entourant le Soleil. À ces débuts, la Terre a connu beaucoup de bombardements, provenant de plusieurs corps cosmiques telles que les comètes et des petits astéroïdes ou météorites.

Ces corps cosmiques étaient probablement très riches en eau et en d'autres éléments chimiques comme par exemple CO_2 , N_2 . L'atmosphère de la Terre primitive résultait de l'échappement des gaz dû aux divers collisions avec sa surface. Cela a permis la formation d'une enveloppe gazeuse retenue en partie grâce aux champs magnétique de la Terre et à sa gravité.

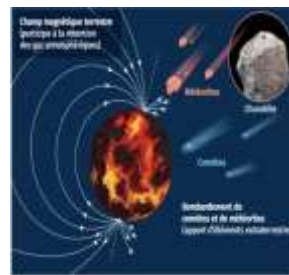


Figure.4 (Chap I)- III-2 Image extraite [www.nfabien-SVT](http://www.nfabien-SVT.com) Enseignement scientifique (Terminale).

Ainsi de **4,4 à 4 milliards d'années**, son atmosphère était principalement composée de la vapeur d'eau ($\text{H}_2\text{O}_{(g)}$), du dioxyde de carbone ($\text{CO}_2_{(g)}$), du méthane ($\text{CH}_4_{(g)}$), de diazote ($\text{N}_2_{(g)}$) et quelques traces d'autres composés volatils.

De **3.2 à 2 milliards d'années à aujourd'hui**, la diminution moyenne de la température de la surface de la terre, a conduit à de nombreux phénomènes de condensation (vapeur d'eau) et de dissolution ($\text{CO}_2_{(g)}$). De ce fait sa composition est passé progressivement à la composition actuelle : N_2 : 78% ; O_2 : 21% ; H_2O variable ; CO_2 0,03% un petit pourcentage de CH_4 .

➤ Lien entre Titan et la Terre primitive :

On a souvent assimilé Titan à une petite Terre primitive gelée. L'atmosphère de la Terre primitive devait avoir une chimie atmosphérique assez proche de celle se produisant sur Titan mais à une température bien plus élevée. Une telle atmosphère (N_2/CH_4) permet la formation de molécules organiques. Il a été montré que lorsque le rapport de CH_4/CO_2 dépasse environ 0.1, des brumes organiques comme sur Titan doivent se former (*Trainer et al.,2006*).

On pense qu'à ses débuts, la Terre primitive a ainsi pu ressembler à Titan et que les brumes organiques formées ont pu être à l'origine des premiers acides aminés et bases azotés nécessaires à l'apparition de la vie. Les chercheurs soutiennent aussi que la formation des brumes organiques a aussi pu être renouvelée par les bactéries méthanogènes (comme les cyanobactéries), qui auraient pu libérer aussi du méthane ($^2\text{CH}_4$) dans l'atmosphère de la Terre Primitive. (*Zerke et al.,2012*) Cette hypothèse devrait être confirmée à l'avenir par de nouvelles observations géologiques. Selon la mission Cassini, il est établi qu'en plus de l'abondance de l'azote, l'atmosphère de Titan contient quelques pourcentages de méthane allant de 1,5 % jusqu'à 5% près de sa surface. Ainsi le méthane présent dans l'atmosphère de Titan jouerait

² Le méthane présent dans l'atmosphère de Titan est produit par divers processus, notamment l'évaporation du méthane liquide des lacs et/ou du méthane piégé dans les couches de clathrate et/ou de la décomposition des molécules organiques présentes dans l'atmosphère. (Voir en annexe (doc.3) cycle du méthane de LESIA et de l'université Paris 12)

un rôle semblable à celle de l'eau sur la Terre. Son atmosphère influencerait sa surface comme le fait celle de la Terre, en la remodelant en permanence sous l'effet des vents et des précipitations. À la différence de la Terre, les pluies sur Titan sont constituées essentiellement de méthane liquide (CH_4). (Voir *Figure.4 III.2 Document 7 en annexe profils de température comparés Terre et Titan*)

3- Les différentes couches de l'atmosphère de Titan :

Sur la figure ci-dessus, on peut identifier les différentes couches de l'atmosphère de Titan :

Exemple : Profil de température de la Titan :

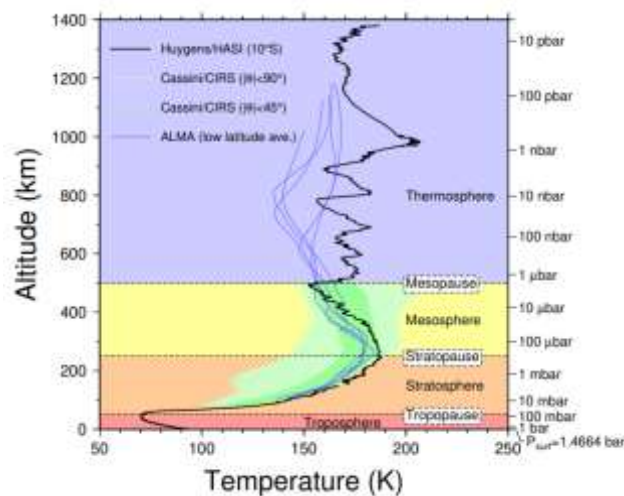


Figure.5 (Chap I)-III-3 Profil de température de Titan mesuré par l'instrument HASI (Profil établi en 2003 avant l'atterrissage de la sonde Huygens) (source The European Space Agency ESA)

La troposphère : elle s'étend de la surface jusqu'à la tropopause à environ 44 km d'altitude. De nombreuses espèces chimiques sont sous formes de cristaux de glace ou de gouttelettes liquides à l'exception de N_2 , de CO ou C_2H_4 qui se trouvent sous forme gazeuse jusqu'à la surface. À plus haute altitude, on y trouve la stratosphère et la mésosphère.

La stratosphère : elle s'étend de 45 km à 300 km d'altitude environ. La température croît avec l'altitude car chauffée par le rayonnement solaire qui est absorbé dans l'UV et dans l'infrarouge proche par la brume photochimique à savoir le méthane et les aérosols. La stratosphère est une zone où le gaz est stratifié. Les gaz se répartissent en couches qui se mélangent difficilement. Au-dessus de la stratopause, la température décroît de nouveau, c'est la mésosphère.

La mésosphère : elle s'étend de la stratopause à la mésopause située à environ 490 km. Le refroidissement de l'atmosphère à ces altitudes est causé par l'émission infrarouge du méthane (CH_4), de l'éthane (C_2H_6) et de l'acétylène (C_2H_2) qui n'est plus absorbée par cette atmosphère devenue très ténue.

CHAPITRE II : Les détections des molécules dans l'atmosphère de Titan

I. EXPLORATION DE TITAN : « Une approche par les missions ».

Contexte historique : Les missions de Voyager 1&2:

Les deux sondes voyager 1 et 2 ont eu pour objectif commun de sonder le système solaire externe, notamment Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. L'un des objectifs de Voyager 1 était de survoler Titan. En novembre 1980, il s'est approché à 4 394 km au-dessus de la surface du satellite puis s'est éloigné du plan de l'écliptique. Aujourd'hui la sonde se trouve aux frontières du système solaire.

Le 27 Août 1981, Voyager 2 passe à une altitude au-dessus de 663 385 km de Titan. La sonde a profité de cette orbite pour utiliser l'assistance gravitationnelle de Saturne afin de continuer son exploration en direction d'Uranus et Neptune.



Figure.1 (ChapII) -I La sonde voyager 2. (Image extraite Microsoft Bing)

Que nous ont appris ces différentes missions sur Titan ?

Les survols de Voyager ont dans un premier temps révélé l'extraordinaire richesse en composés organiques dans l'atmosphérique de Titan (*Owen, 1982*). Puis elle a été confirmée grâce à la mission Cassini-Huygens (*Hörst, 2017*).

1- Les missions de Voyager 1 et 2 (1980-1982) :

Les principaux résultats des missions Voyager près de Titan concernent essentiellement son atmosphère. Il a fallu attendre novembre 1980, grâce au survol ($\approx 4000\text{km}$ d'altitude) de Titan par Voyager 1, pour observer à l'aide des images prises dans le visible par la sonde, que l'atmosphère de Titan était emplie d'une brume de couleur jaune dorée due probablement à certaines particules qui y seraient en suspension. Ce survol a permis la détection de l'azote moléculaire ($\text{N}_{2(g)}$) par diffusion des photons solaires ultraviolet et grâce à ses raies d'absorption détectées en UV au cours de l'expérience d'occultation solaire par l'atmosphère. De plus il a révélé la présence de méthane (CH_4), avec des quantités significatives d'hydrogène moléculaire (H_2) et de monoxyde de carbone (CO) (*Broadfoot et al., 1981*). Ce survol a permis en outre de mettre en évidence des matériaux à faible réflectivité qui sont apparus sous la forme d'une épaisse couche de brume orange. Ainsi l'atmosphère de Titan serait constituée en partie de brumes et de particules d'aérosols.

On les classe généralement dans un groupe chimique dont les analogues de laboratoire sont appelés « Tholins ». La sonde Voyager 2 nous avait envoyé une image de son atmosphère qui est celle d'une boule de couleur orangée uniforme.



Figure.2 (ChapII) I.1 photographie de Titan par la sonde voyager 2. (Source Nasa)

➤ **Qu'appelle-t-on brumes organiques ou aérosols ?**

Une définition un peu large pour la brume organique solide serait tout solide organique complexe abiotique formé chimiquement par un mélange source d'énergie et gaz.

Ici on parle de particules solides organiques se formant dans les atmosphères à partir de la photolyse/dissociation UV de l'azote et du méthane. Ces particules solides ressemblent à des petits grains de poussière dont la taille est inférieure à 2,5 μm environ.

Toutefois il est important de distinguer deux types d'aérosols dans notre étude.

- Les particules de brumes de type Tholins, autrement dit des solides organiques qui sont des produits issus de la photochimie. Ils se forment par agrégation de petites molécules appelées monomères.
- Et des aérosols de type glace qui sont des particules de glaces solides obtenues par condensation des hydrocarbures comme par exemple le méthane, l'éthane ou les composés aromatiques dérivés du benzène, etc...Elles se forment par condensation aux très basses températures et par nucléation dans l'atmosphère de Titan. La brume de Titan est surtout composée de Tholins, avec parfois un mélange de gouttelettes de CH_4 ou des cristaux de glace qui vont se nucléer dessus.

Précisons toutefois que les « Tholins », ce sont des matières organiques rouge-orangées ou brumes dont le nom a été proposé par Carl Sagan et ses collègues en 1990 pour qualifier cette matière inconnue sur Terre mais présente également sur Triton et Pluton.

➤ **Qu'a révélé l'analyse de ces mesures ?**

Tout d'abord, il n'y a aucunes couches ionisées dans la haute atmosphère de Titan. Les mesures ont révélé une densité moyenne de $1,881 \pm 0,002 \text{ g cm}^{-3}$ pour le satellite. En raison de l'échappement du dihydrogène (H_2) au cours de la vie de Titan, l'azote moléculaire est aujourd'hui le principal constituant atmosphérique de Titan. En effet des mesures ont été effectuées et confirmées par les instruments de la mission spatiale *Cassini-Huygens* grâce au spectromètre de masse par chromatographe en phase gazeuse (GCMS) de la sonde *Huygens*. (H.B. Niemann, S.K. Atreya (*Space Sci. Rev.* 2002, 104, 553–591, DOI : 10.1023/A :1023680305259))

2- La mission Cassini-Huygens (2004-2017) :

Cette mission était un projet conjoint entre la NASA, responsable de l'orbiteur *Cassini*, et l'ESA, qui a construit l'atterrisseur *Huygens*. La sonde fut lancée en 1997, son but principal consistait à étudier la planète Saturne ainsi que ses différentes lunes, avec une attention particulière sur Titan. (Voir annexe

quelques instruments). Ces derniers permettent des études variées de l'environnement de Saturne (magnétosphère, plasma et particules chargées) de l'exosphère et des atmosphères de la planète et de ces lunes. Elle a permis de sonder par ailleurs les surfaces des satellites dans certaines gammes de longueurs d'onde, des ondes radios à l'UV en passant par le radar (Radar de Cassini en mode Imageur [1mm à 1m] ou altimètre), le visible et l'infrarouge (Caméra Infrarouge de Cassini [1 μ m et 5 μ m], des spectromètres de masse : par chromatographe en phase gazeuse (GCMS) de la sonde Huygens, VIMS (spectromètre à imagerie en lumière visible [0,4 μ m ; 0,8 μ m] et en infrarouge \approx [0,85 μ m ; 5 μ m]).

→ Quelles étaient les objectifs de cette mission ?

La sonde Cassini devait apporter des réponses aux principaux objectifs scientifiques de la mission qui sont, d'après (Coustonis et al. 2009) :

- Déterminer précisément les concentrations des composés atmosphériques et leurs profils horizontaux et verticaux.
- Détecter des espèces chimiques non observées par des mesures précédentes ;
- S'intéresser aux sources d'énergies initiatrices de cette chimie atmosphérique unique ;
- Étudier la formation, la composition et la distribution des aérosols ;
- Étudier la haute atmosphère, sa partie ionisée et son rôle comme source de composés à la fois neutres et ioniques.

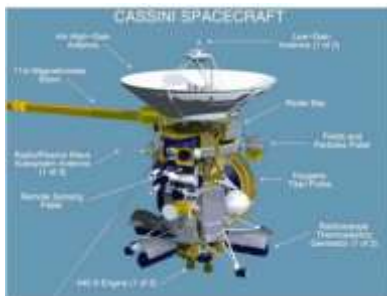


Figure.3 (ChapII) -I. 2. Schéma de la sonde Cassini. (Source Nasa)

→ Quels ont été les différents dispositifs expérimentaux embarqués ?

La sonde Cassini a transporté à son bord douze instruments scientifiques dédiées aux mesures. Les instruments embarqués par exemple à bord de la sonde Cassini tels que VIMS et les différents spectromètres de masses :

→ CAPS (Cassini Plasma Spectrometer) = Spectromètre à plasma de Cassini a pour objectif de mesurer les particules rencontrées sur son chemin.

→ INMS (Ion and Neutral Mass Spectrometer) = Spectromètre de particules chargées et neutres a pour objectif d'analyser les particules chargées (protons ou ions lourds)

Ils ont permis de cartographier, de sonder parfaitement l'atmosphère ainsi que la surface de Titan. C'est grâce aux mesures réalisées et les photos prises lors de la descente de la sonde Huygens que les scientifiques ont pu détecter une grande variété de molécules présentes à différentes altitudes de l'atmosphère de Titan.

→ L'instrument VIMS (*spectromètre à imagerie en lumière visible et en infrarouge*) a détecté des nuages principalement composés de méthane et d'éthane (C_2H_6). L'instrument VIMS est capable d'observer des occultations stellaires et solaires par Saturne, ses anneaux ou Titan. C'est le seul instrument de Cassini capable d'observer des occultations stellaires ou solaires dans le visible et le proche infrarouge. Cet appareil permet une visualisation tridimensionnelle (*2 dimensions spatiales et 1 dimension spectrale*) de la structure atmosphérique du point de vue de la température, de la chimie et des aérosols.

Le but des observations d'occultations est d'obtenir des profils verticaux de distributions des gaz et des aérosols de l'atmosphère. (*Voir complément sur les instruments de Cassini en annexe document 5*).

➤ **Que nous a appris la mission Cassini-Huygens ?**

Lors de la mission Cassini-Huygens, on a pu observer des réseaux de drainages qui ne seraient pas créés par l'eau liquide mais par des pluies de méthane liquide.

Toutefois, le cycle du méthane (CH_4) sur Titan ne peut pas être considéré comme un système fermé car le méthane est régulièrement détruit suite aux réactions photochimiques induites par les ultraviolets (UV) solaires dans la haute atmosphère. (*Voir document 3 en Annexe : cycle du méthane*) On a constaté que l'association des deux composés majoritaires (N_2 et CH_4) qui y sont présents, conduisent par des réactions photochimiques en chaîne à la formation de molécules organiques complexes d'intérêts exobiologique. Par ailleurs, la mission Cassini a également révélé la présence d'hydrocarbures liquides à la surface de Titan. Bien que la quantité de ces ³hydrocarbures liquides détectés soit faible par comparaison aux réservoirs d'eau sur Terre (le volume total d'eau sur Terre $\approx 1,386.10^9 \text{ km}^3$ dont 97,5% eau liquide salée et 2,5% eau douce (dont $\approx 0,3\%$ liquide), elle pourrait maintenir un cycle de précipitation assez important sur Titan. De plus, de nombreuses structures nuageuses composées de gouttelettes de méthane liquide et de glace d'éthane ont été observées dans les années 1990 à partir du télescope spatial « Hubble » et d'autres grands télescopes au sol. La sonde Cassini a ainsi permis d'explorer de plus près ces structures nuageuses et de comprendre la météorologie de Titan. Titan serait donc, avec la Terre, le seul corps du système solaire avec du liquide stable en surface. Il y aurait donc des lacs composés d'un mélange liquide de méthane-éthane (C_2H_6). (≈ 400 lacs probablement identifiés au pôle nord de Titan dont le plus grand mesure $\approx 1/5$ de la France © 2008 [NASA/JPL-Caltech/ASI/USGS](#) et [Pierre Thomas 2008](#)).

Les mesures in-situ ont ainsi permis d'établir un profil de température qui sert aujourd'hui de référence et permet de mesurer avec précision l'abondance du méthane ([Fulchignoni et al. 2005](#)). Comme toute atmosphère, celle du Titan évolue aussi avec le temps, une partie peut s'échapper vers l'espace, elle peut être approvisionnée par du volcanisme apportant des gaz de la sous-surface. Il est montré que l'échappement atmosphérique élimine préférentiellement

³ Probablement des mers et des lacs liquides ammoniacés et méthanés d'environ 200 km d'épaisseur ([Pierre Thomas 2008](#) et source [Nasa mars 2008](#))

l'isotope le plus léger de l'atmosphère (*Lammer et al. (2020)*) tandis que la photolyse du diazote (N_2) élimine préférentiellement l'isotope le plus lourd (*Liang et al., 2007*).

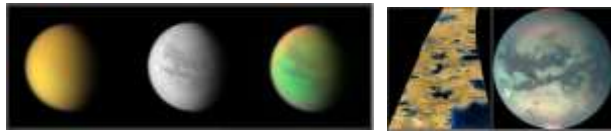


Figure.4 (Chap II) I.2 : Quelques images de Titan et de son atmosphères prises lors de la mission Cassini. (Source Nasa)

II. QUELLES TECHNIQUES ET MÉTHODES ONT PERMIS DE DÉTECTER AUTANT DE MOLÉCULES DANS L'ATMOSPHÈRE DE TITAN ? (Une approche par l'expérience)

On s'intéresse dans cette partie à une approche des techniques et des méthodes expérimentales qui ont accompagnés les différentes missions évoquées au paragraphe précédent. L'objectif est de rappeler quelques méthodes et principes physiques sur lesquels s'appuient les mesures.

Parmi les méthodes de détections qui ont contribué à faire l'inventaire des espèces chimiques, on peut citer l'occultation par ondes radios.

1- Méthode d'occultation par ondes radios : « Observation depuis la Terre ».

L'occultation est un phénomène fréquemment exploité par les sondes spatiales qui sont chargées d'explorer le système solaire pour étudier les planètes et leurs satellites. Parmi les diverses méthodes d'occultation, celle par ondes radios envoyés vers la Terre a permis de recueillir des informations sur l'atmosphère de Titan.

➤ Qu'est-ce qu'une occultation par onde radio ?

La technique est basée sur l'envoi de signaux radios depuis la sonde à travers l'atmosphère de Titan vers des récepteurs situés sur Terre dans la ligne de visée. (Une figure de la méthode est retrouvée en annexe : *document 4*) Cette méthode a été utilisée lors des missions Voyager et Cassini-Huygens.

➤ Observation depuis la Terre.

L'analyse d'occultations solaires et stellaires par Titan observées par l'instrument Cassini/VIMS (*2006*) est de mesurer la transmission du flux solaire ou stellaire à travers l'atmosphère de Titan. Les données sont constituées de courbes de lumière à différentes longueurs d'onde et de spectres infrarouges pour différentes altitudes de visée. L'étude des courbes de lumière ainsi obtenue montre qu'il s'agit d'occultations par absorption comme c'est le cas pour les occultations observées depuis la Terre. La baisse de signal observée est donc due à l'absorption du flux lumineux par le gaz et les aérosols de l'atmosphère. Les spectres en transmission présentent des bandes d'absorption du méthane à différentes longueur d'onde d'absorption. Toutefois l'étude du méthane est centrée essentiellement autour de la longueur d'onde $\lambda \approx 3,3 \mu m$. De plus ces observations faites depuis la Terre révèlent également la présence d'une faible quantité de monoxyde de carbone (CO) à hauteur de 50 ppm. Elle est

détectée en dessous de 180 km autour d'une longueur d'onde d'absorption centré sur $\lambda \approx 4,7 \mu\text{m}$. Ce qui en fait la quatrième molécule la plus abondante de l'atmosphère de Titan. En dessous de 500 km environ, on a pu détecter, une absorption supplémentaire, centrée sur $3,4 \mu\text{m}$ qui se superpose à la bande du méthane à $3,3 \mu\text{m}$. Cette bande caractérise la vibration des liaisons C - H au sein de longues chaînes aliphatiques

2- La spectrométrie de masse et son principe :

La méthode privilégiée pour la détermination de la composition chimique et des conditions physiques des atmosphères planétaires et les lunes est la spectroscopie.

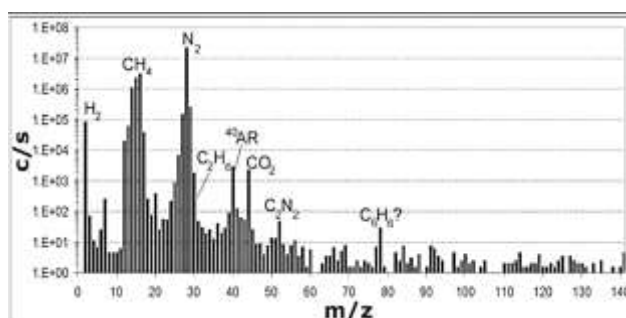
➤ **Rappel du principe général d'un spectromètre de masse :**

(Voir en annexe : *document 6. Schéma et principe des analyseurs*)

La spectrométrie de masse est une technique analytique qui permet la détermination des masses moléculaires des composés analysés ainsi que leur identification et leur quantification. Elle permet d'identifier un composé en le bombardant avec des électrons de haute énergie. Cela génère des fragments ioniques dont l'analyse permet de déterminer sa masse molaire et sa formule. Ces ions proviennent de la molécule à analyser. En outre elle permet, de corréler le spectre d'un composé avec sa structure, d'expliquer des mécanismes de ruptures de liaisons, de trouver les facteurs rendant plus ou moins probable la formation de l'un ou l'autre des fragments ioniques.

➤ **La spectrométrie de masse à bord de Cassini.**

Les trois spectromètres de masse à bord de la sonde Cassini avaient des modes de fonctionnement différents mais ils reposaient tous les trois sur le même principe. Les ions étaient directement recueillis dans l'atmosphère de Titan ou issues de l'ionisation des molécules neutres en entrée de l'instruments. Puis ils sont triés selon leur rapport masse/charge grâce à des champs électriques internes. Les instruments INMS et GCMS de Huygens étaient des spectromètres de masse à quadrupole car les ions subissent un champ électrique variable de haute fréquence créé par des paires d'électrodes. En faisant varier ce champ électrique, seuls les ions avec certain rapport en masse (m) sur charge(z) : « m/z » peuvent passer au travers du quadrupole et être ainsi détectés. Voir ci-dessous le spectre de masse des mesures réalisées dans l'atmosphère de Titan par les différents spectromètres de masse de Cassini.



↪ En abscisse, le rapport m/z (masse molaire/charge) des molécules.

↪ En ordonnée, l'abondance relative (en échelle logarithmique) des différents composés gazeux.

Figure.5 (Chap II) II.2 : Spectre de masse provenant des mesures de la sonde Cassini. Source : Abondance des molécules gazeuses dans l'atmosphère de Titan mesurée au spectromètre de masse - © 2005 [ESA/NASA/GSFC/ASI/GCMS Team](#)

3- Les résultats et conclusions des premières observations faites par la sonde Pioneer 11 et les sondes Voyager 1 et 2.

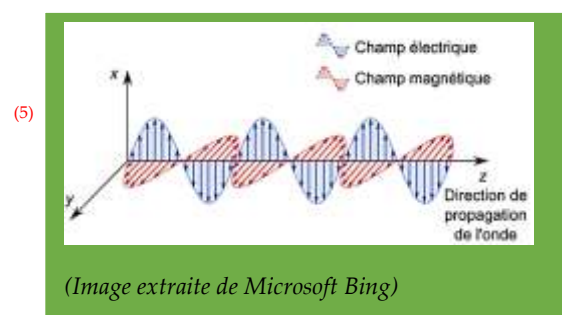
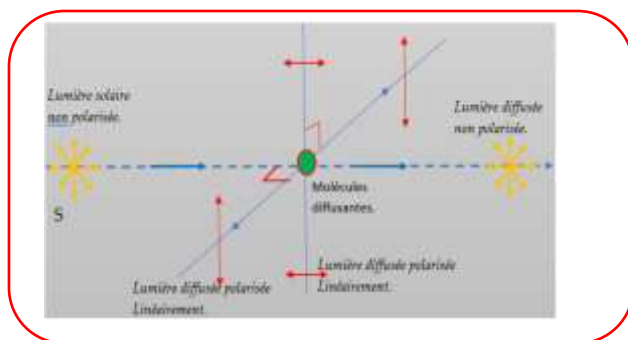
Ainsi lorsque les sondes Pioneer 11 et Voyager ont reçu la lumière du soleil diffusée par l'atmosphère de Titan, les scientifiques ont constaté que cette lumière était fortement polarisée.

➤ *Rappel : « notion de lumière polarisée » :*

La polarisation est un phénomène dû à la nature ondulatoire du rayonnement électromagnétique. La polarisation de la lumière est un processus physique dans laquelle une lumière non polarisée est convertie en lumière polarisée. Il existe plusieurs modes de polarisation de la lumière, soit la polarisation par réflexion vitreuse, par diffusion atmosphérique, par dichroïsme ou par biréfringence... Lorsque les ondes lumineuses vibrent dans un seul plan elles sont dites ondes polarisées, si elles vibrent dans plusieurs plans elles sont dites non polarisées. Par exemple la lumière du soleil est une lumière non polarisée car elle se propage dans toutes les directions (isotrope). Autrement dit le champ électrique associé à la lumière naturelle possède une direction aléatoire qui varie continuellement. Au contraire dans une lumière polarisée linéairement, la direction de vibration du champ électrique est fixe c'est-à-dire il conserve sa direction.

➤ *La polarisation par diffusion :*

La diffusion ⁴ de la lumière incidente du soleil par des petites molécules ou particules solides s'expliquent par le fait que le champ électrique de la lumière excite les nuages électroniques des molécules. Ces molécules excitées se chargent et se comportent comme des petits dipôles oscillants en mouvements accélérés qui rayonnent à leur tour un rayonnement (ou des ondes) perpendiculaire à leur direction d'oscillation. Ainsi, la direction dans laquelle oscille la lumière polarisée est appelée direction de polarisation.



Cette forte polarisation rectiligne ⁵ de la lumière solaire diffusée à 90 ° dans des gammes de longueurs d'ondes correspondant aux bleues et rouges est due à la présence des aérosols. De tels phénomènes semblables à ceux observés dans l'atmosphère terrestre sont généralement dus à de fines particules solide ou liquide dont la taille est suffisamment petite comparée à la longueur d'onde du rayonnement solaire. Grâce à ces observations recueillies par les sondes

(4) Lorsqu'un rayonnement n'est pas absorbé il peut être dévié en partie dans différentes directions, c'est ce qu'on appelle la diffusion. Pour la diffusion atmosphérique, on en distingue 3 modes : Diffusion de Rayleigh (taille des molécules $\ll \lambda_{\text{rayonnement}}$) - Diffusion de Mie (taille des particules de l'ordre ou un peu plus grande que $\lambda_{\text{rayonnement}}$) - Diffusion non sélective (Taille des particules $\gg \lambda_{\text{rayonnement}}$) : $\lambda_{\text{rayonnement}}$ = longueur d'onde du rayonnement incident.

(5) L'onde est polarisée verticalement car son champ électrique oscille selon la direction verticale.

Voyager, on a pu conclure que la taille des particules dans l'atmosphère de Titan ne dépasserait pas $0,1 \mu\text{m}$. La théorie quantique et la théorie ondulatoire de la lumière permettent d'expliquer les différentes interactions entre lumière & matière. C'est la raison pour laquelle Titan apparaît entouré d'un anneau brillant lorsqu'il est observé dans les longueurs d'ondes du bleu. De même la très forte diffusion de la lumière solaire vers l'avant de Titan ne peut s'expliquer que grâce aux phénomènes d'interférences entre le rayonnement solaire incident et les particules. Or une telle diffusion ne peut se produire que si les particules sont de grande taille comparée à la longueur d'onde incidente. Ce qui laisse, supposée que ces dernières sont constituées d'un nombre d'atomes beaucoup plus important.



Figure.2 : Chap IV-I.2a extrait de l'ouvrage « Les mondes de Saturnes ».

La lumière solaire diffusée vers l'avant, par les particules atmosphériques de grande taille comparée à la longueur d'onde, forme un anneau orangé légèrement bleuté en périphérique.

D'après ces observations, la très forte diffusion vers l'avant de la lumière solaire visible, montre que les particules qui en sont responsables sont de taille comparable ou supérieure à $0,5 \mu\text{m}$, tandis que la diffusion dans une direction perpendiculaire au rayonnement incident nous indique que les particules sont de taille plus petite ne dépassant pas $0,1 \mu\text{m}$. Il y aurait dans l'atmosphère de Titan, des agrégats peu compacts formés de milliers de petits sous-ensemble sphériques que l'on appellerait des monomères par analogie à la polymérisation en chimie organique. De ce fait les agrégats de grande taille seraient responsables de la forte diffusion vers l'avant de la lumière et les petites structures seraient responsables de la diffusion. De plus, ces détections ont permis de découvrir une structure verticale dans le profil de brume, révélant une couche de brume détachée entre 340 et 360 km d'altitude (*Rages & Pollack, 1983*).

4- Les observations in situ faites par DISR. (Descent Imager/Spectral Radiometer).

Lors de la descente de la sonde Huygens ⁽⁶⁾, des observations in situ dans l'atmosphère de Titan ont été réalisées. Grâce à l'instrument DISR embarqué sur la sonde, on a pu obtenir les premières mesures in situ des aérosols de Titan. Elles ont révélé la manière dont les particules polarisent la lumière solaire dans les longueurs d'ondes bleus et rouges à partir de 140 Km d'altitude et jusqu'à la surface. Cependant les observations de DISR n'ont révélé aucune variation significative de la taille des monomères en fonction de l'altitude allant de la surface à 140 km d'altitude (*Tomasko et al., 2008*). Les données ainsi recueillies par DISR en dessous de 80 km indiquent que la brume est un mélange d'aérosols produits photochimiquement et d'éléments condensés (*Tomasko et al., 2008*).

⁽⁶⁾ Voir document 9 figure 5 en annexe : Schéma du module de descente Huygens et de ses instruments scientifiques. Crédit : "The Huygens mission", ESA bulletin 77.

CHAPITRE III : UNE CHIMIE COMPLEXE DANS L'ATMOSPHÈRE DE TITAN.

Historiquement, dans les années soixante-dix, certaines études réalisées à partir d'observations spectrométriques à l'observatoire du Mont Wilson en Californie, ont montré que l'atmosphère de Titan absorbe des rayons ultraviolets du soleil. Très naturellement les chercheurs de l'époque tentèrent d'élaborer des modèles afin de percer la chimie complexe qui anime l'atmosphère de Titan.

Quels modèles peuvent être établis à l'aide des données recueillies lors des différentes missions spatiales ?

I- MODÈLE PHOTOCHEMIQUE DE L'IONOSPHERIQUE, MÉSOSPHERE ET TROPOSPHERE EN PHASE GAZEUSE. (Approche par modèle)

1. Comment se forment les molécules les plus simples dans l'atmosphère de Titan ?

La molécule de méthane est le plus simple des hydrocarbures saturés. Elle contrôle le climat de Titan, entre autres par le biais du transfert radiatif ou de la formation des brumes et des nuages. La mission Cassini a également révélé la présence d'hydrocarbures liquides à la surface de Titan.

a- Le contexte historique :

Les chercheurs de l'époque ont pensé que ces observations spectrométriques étaient probablement dues à des petites particules de l'ordre du micromètre qui étaient responsables de cette absorption à haute altitude. Beaucoup de questions émergent de ces absorptions, telles que : Sont-elles produites par une chimie atmosphérique à base de méthane ? Une telle chimie, pourrait-elle être à l'origine de la formation des premières molécules du vivant ?

Les chercheurs en planétologie ont abordé le problème selon trois approches plutôt complémentaires.

⇒ 1^{ère} démarche : Recherche de signatures dans l'IR.

Tout d'abord la première démarche scientifique consistait à chercher les signatures de molécules simples qui peuvent se former facilement à partir du méthane. C'est ainsi que les observations dans le domaine infrarouge ont permis d'aboutir à la détection de trois hydrocarbures : acétylène de formule brute C_2H_2 , l'éthylène de formule C_2H_4 et l'éthane (C_2H_6).

⇒ 2^{ème} démarche : La simulation numérique.

Puis grâce au support de la simulation numérique qui tente de reproduire au mieux la chimie de photodissociation, les premières simulations ont ainsi permis d'obtenir plusieurs espèces chimiques issues de la photodissociation du méthane.

Quels sont les résultats d'une telle photodissociation ?

Il s'agit d'une fragmentation sous photons UV c'est-à-dire que les liaisons chimiques entre les atomes de carbone et d'hydrogène vont se rompre grâce à l'énergie apportée par les photons,

cette étape s'appelle la photodissociation. Au cours de cette étape, il se forme plusieurs fragments très réactifs soient sous forme de radicaux ou ionisés. Dans le cas du méthane qui est une molécule assez petite, la photodissociation de celle-ci entraîne petit à petit sa destruction dans la haute atmosphère. Toutefois, d'après les modèles photochimiques, la vitesse à laquelle ces réactions se produisent, le méthane actuellement présent dans l'atmosphère de Titan devrait avoir totalement disparu. Ce qui à priori n'est pas observé.

Première conclusion : Il y a donc nécessairement une ou plusieurs sources de méthane capables d'alimenter l'atmosphère de Titan. (*Des Lacs : voir cycle du méthane en annexe : Document 3 : Figure.2*)

b- Rappel sur le processus par voie photochimique :

Cependant afin de bien comprendre rappelons quelques définitions théoriques qui servent de bases à la compréhension des réactions chimiques. Nous devons donc distinguer les réactions homolytiques des réactions hétérolytiques.

- **Qu'est-ce qu'une hétérolyse ?**

Il s'agit d'une situation où les liaisons chimiques se rompent et qu'un atome emporte les deux électrons de la liaison. Le processus est une hétérolyse. Les produits formés par la réaction hétérolytique sont dans ce cas des ions (atomes ou molécules chargées positivement ou négativement). Il s'agit alors d'une réaction d'ionisation.

- **Qu'est-ce qu'une homolyse ?**

C'est un processus dans lequel lorsque les liaisons se rompent et chacun des atomes constituant la liaison emporte avec lui un électron. Ce processus est une homolyse. Les produits formés par la réaction homolytique sont dans ce cas des radicaux qui peuvent être des atomes ou des molécules. Les radicaux doivent comporter un électron célibataire.

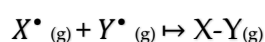
⇒ Une rupture homolytique peut être provoquée grâce à l'énergie transportée par les photons de la lumière. Typiquement la lumière rouge correspond à une énergie de l'ordre de 167 kJ.mol⁻¹ ; la lumière bleue de l'ordre de 293 kJ.mol⁻¹. L'ultraviolet (λ ≈ 200 nm) est associé à une énergie de l'ordre 586 kJ.mol⁻¹ ce qui peut provoquer la décomposition de nombreux composés organique. Toutefois, il ne suffit pas que la lumière ait assez d'énergie pour la rupture, il faut aussi que la molécule puisse avoir un mécanisme pour l'absorber.

La plupart des radicaux simples sont très réactifs du fait de leur électron célibataire, cela signifie que leur durée de vie est courte. De ce fait, les radicaux simples c'est-à-dire des radicaux alkyls réagissent vite. En chimie, il existe une grandeur appelée « énergie de liaison » et c'est cette grandeur qui donne une idée de la facilité de formation des radicaux. Ces énergies de liaison nous renseignent donc sur la stabilité des radicaux formés.

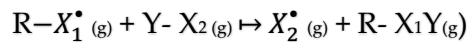
- **Comment les radicaux réagissent-ils ?**

En général deux voies générales possibles que nous pouvons résumer ici :

- Voie 1 : Radical + radical ⇒ molécule à spins appariés



- Voie 2 : Radical + molécule à spins appariés \mapsto nouveau radical + nouvelle molécule



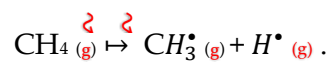
Les réactions photochimiques qui se produisent dans l'atmosphère de Titan suivent ces deux voies principales. On peut par exemple former lors des photodissociations, les fragments radicaux suivants : CH_2^{\bullet} ; CH_3^{\bullet} ; CH^{\bullet} . Ensuite au cours de plusieurs étapes intermédiaires, ces radicaux peuvent s'associer assez facilement. En fonction des énergies et des orientations nécessaires pour franchir la barrière d'énergie potentielle de réaction, les radicaux peuvent produire des hydrocarbures plus complexes.

La décomposition du méthane par photolyse dans la haute atmosphère donne lieu à une série de réactions chimiques menant à des composés chimiques variés. Par exemple lors de la photodissociation de deux molécules de méthane CH_4 , il se forme deux radicaux CH_3^{\bullet} et deux atomes d'hydrogène selon le processus simplifié suivant : (extrait « *Les mondes de Saturne* »)

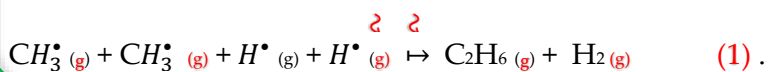
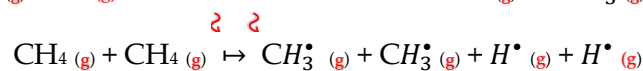
Photon d'énergie « $h\nu$ »



Photon d'énergie « $h\nu$ »



et

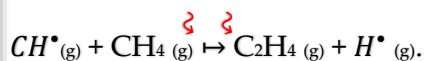


De plus ces simulations ont montré que certaines réactions conduisaient à la formation du dihydrogène gazeux (l'hydrogène moléculaire $H_2 (g)$). La formation de l'hydrogène moléculaire est due à la chimie atmosphérique. Ils ont ainsi déduit que l'éthane (C_2H_6) est probablement l'hydrocarbure le plus abondant après le méthane (CH_4) dans l'atmosphère de Titan.

\mapsto Exemple de réaction de formation de C_2H_4 .

C'est le principal hydrocarbure de type C_2H_x de l'atmosphère

Le radical « CH^{\bullet} » réagit avec le méthane CH_4 pour former C_2H_4 selon l'équation :



3^{ème} démarche : Simulations par des expériences :

La dernière démarche se basait sur les expériences de laboratoire qui s'inspiraient de l'expérience de Miller -Urey (1953) dont l'objectif était de reproduire la chimie atmosphérique de la Terre primitive. Les chercheurs ont ainsi tenté de reproduire la chimie de l'atmosphère de Titan. L'expérience consistait à enfermer dans une enceinte fermée, un gaz principalement

composé de méthane. Puis on soumet ce système à une décharge électrique qui a pour but de rompre les liaisons chimiques pour fragmenter les molécules.

L'idée était de tenter de simuler l'énergie déposée par les photons Ultraviolets dans la haute atmosphère de Titan. L'énergie ainsi créée par cette décharge a permis d'observer la formation de petites particules brunâtres constituées de nombreuses espèces chimiques organiques.

Grâce à ces simulations expérimentales et aux observations de Titan dans l'UV, les chercheurs ont pu attester de la présence de petites particules en suspension.

Les premiers résultats de ces trois approches semblent converger vers la même conclusion : une chimie organique qui impliquerait l'élément carbone serait très active dans l'atmosphère de Titan. Une telle conclusion conduit les chercheurs à se poser bien de questions telles que :

- Y a-t-il une limite à une telle chimie ?
- Quelles sont les molécules les plus complexes capables de se former dans l'atmosphère de Titan ?
- Une telle atmosphère, pourrait-elle constituer un laboratoire de formation de molécules prébiotique c'est-à-dire être à l'origine de la vie ?

Ce sont donc ces questions qui motivent nos chercheurs et qui étaient à l'origine de la modification de la trajectoire de la sonde Voyager 1 afin qu'elle puisse survoler Titan et s'écarter ainsi de sa mission principale qui était de visiter Pluton.

c. Une chimie complexe dans la haute atmosphère de Titan :

La photochimie de molécules simples contenant des atomes de carbone, d'hydrogène, d'azote et d'oxygène dans l'atmosphère de Titan a été étudiée en utilisant des schémas chimiques mis à jour. La photolyse du méthane et la photochimie organique sur Titan peuvent se faire à de très basses pressions et températures. Le principal produit de cette photolyse est l'éthane (C_2H_6) mais d'autres hydrocarbures plus complexes sont aussi formés. Ainsi les produits issus de cette photolyse sont tout d'abord des gaz, typiquement les hydrocarbures C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , et des nitriles (HCN). Ces réactions chimiques nécessitent une certaine quantité d'énergie pour pouvoir se réaliser.

➤ **Quelles sont les sources d'énergie nécessaires à ces réactions photochimiques ?**

Parmi les différentes sources d'énergies capables de dissocier ou d'ioniser les molécules d'azote ou de méthane, nous pouvons citer : les photons solaires UV, VUV ($\lambda < 150$ nm) et EUV ($\lambda < 50$ nm), les électrons issus de la magnétosphère de Saturne, des ions ou des photoélectrons énergétiques (issus de l'ionisation par des rayons X ou EUV⁽⁷⁾) ou encore les rayons cosmiques. Ces différentes sources d'énergies sont responsables de la dissociation de N_2 et CH_4 dans la haute atmosphère. (Résumé de toutes sources d'énergie (Document 10 : Figure.6 (Crédit : Cable et al. 2012)).)

⁽⁷⁾ **Le rayonnement ultraviolet extrême (EUV)** : il est produit naturellement par la couronne solaire et artificiellement par du plasma et des sources de rayonnement synchrotron. Rayonnement électromagnétique tel que $\lambda \in [10 ; 124]$ nm.
https://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_ultraviolet_ext%C3%AAm.

La haute atmosphère de Titan est ainsi totalement exposée au vent solaire, ces particules chargées peuvent alors prendre le dessus sur tous les autres processus énergétiques.

Ces dissociations et/ou ionisations vont ouvrir la voie à des réactions chimiques qui vont aboutir à la formation d'hydrocarbures ou encore de composés azotés comme des nitriles (ex. $\text{H-C}\equiv\text{N}$ cyanure d'hydrogène ou encore $\text{CH}_3\text{-C}\equiv\text{N}$ acétonitrile (ou cyanure de vinyle ⁽⁸⁾) (Waite et al. 2005) (Vuitton et al. 2006).

➤ **Quelles sont les réactions possibles au sein de l'atmosphère de Titan ?**

En 1982, à l'aide des missions Voyager, les chercheurs tels que Yuk Lin. Yung, Mark Allen et Joseph P. Pinto ont soutenu que la composition, la climatologie ainsi que l'évolution de l'atmosphère de Titan sont contrôlées par cinq processus majeurs :

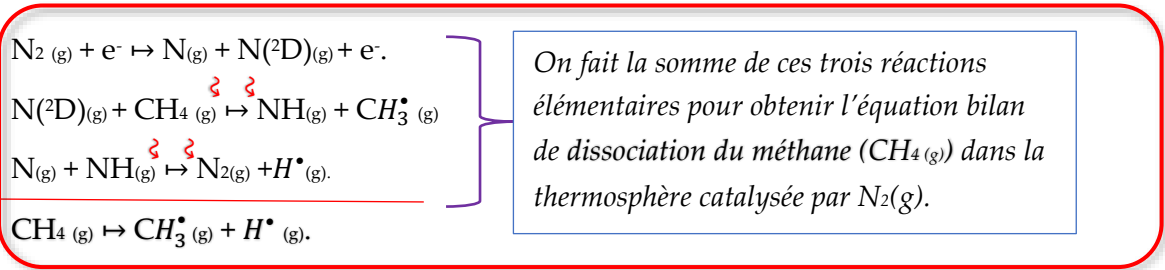
- ❖ (a) la photolyse et la dissociation photosensibilisée du CH_4 ;
- ❖ (b) la conversion de H en H_2 et l'échappement de l'hydrogène ;
- ❖ (c) la synthèse des hydrocarbures supérieurs (C_2H_x , C_3H_x , C_6H_6 ou C_6H_x) ;
- ❖ (d) le couplage entre l'azote et les hydrocarbures ;
- ❖ (e) le couplage entre l'oxygène et les hydrocarbures.

➤ **Exemples de processus primaires dans la thermosphère et la mésosphère.**

↳ Exemples de Réactions de dissociation de l'azote et du méthane :

L'azote moléculaire est considéré comme le produit le plus probable de la photolyse de l'ammoniac dégazé, accrété lors de la formation de Titan. La dissociation de N_2 se produit facilement dans la thermosphère à la suite d'interactions avec des électrons énergétiques d'origine magnétosphérique. Selon Yuk Lin. Yung et Mark Allen, la chimie globale de l'azote dans la thermosphère peut être résumée par deux schémas :

Schéma 1 : N et $\text{N}(^2\text{D})$, respectivement, désignent l'état fondamental (^4S) et l'état excité (^2D) de l'atome d'azote. (Les produits ont été déduits sur la base des travaux d'Oran, Julienne et Strobel (1975), et de Yung et al. (1977).) (Extrait Yuk L. Yung and Mark Allen 1984)

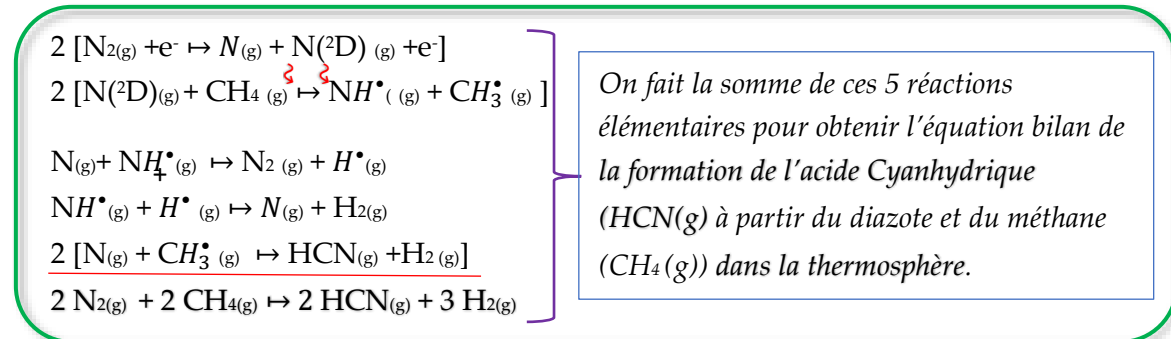


Dans cet exemple, le schéma (1) est un cycle catalytique de dissociation du CH_4 . Les radicaux CH_3^{\bullet} produits peuvent ensuite réagir soit avec N, OH ou d'autres radicaux d'hydrocarbures.

⁽⁸⁾ Détecté la première fois dans l'atmosphère de Titan par spectroscopie radioastronomie en 2014 (gamme de fréquences de 230 à 232 GHz) d'après les archives de l'ALMA (publié en 2017 par Sciences Advances : Maureen Y. Palmer et al).

Schéma 2 : Ceci est la principale source de HCN sur Titan. (Selon (Messing et al. 1981), M. Lin (1982).

L'acide cyanhydrique « HCN » formé dans la thermosphère de Titan est ensuite éliminé par transport vers la stratosphère puis suivi d'une condensation à la tropopause.

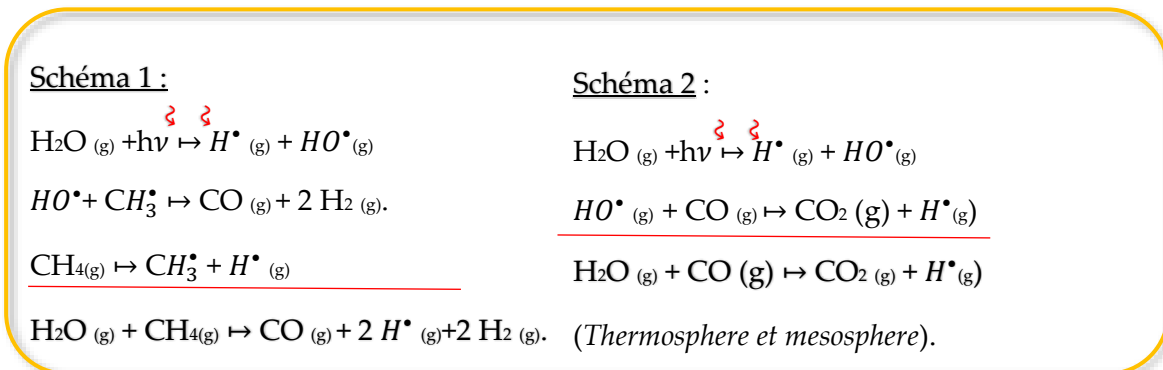


Ainsi la dissociation de l'azote moléculaire (N₂) dans la haute atmosphère conduit à la formation de nitriles, le plus abondant étant le cyanure d'hydrogène, HCN.

→ Exemple de Réaction de photodissociation de H₂O. (Levy 1971; McConnell, McElroy, and Wofsy 1971 (H₂O_(g) + hν → H[•]_(g) + HO[•]_(g)))

Il est fort probable que l'apport de H₂O soit dû à des micrométéorites sur Titan comme cela a pu l'être sur Terre. Ainsi les éléments entrants dans l'atmosphère sont plutôt sous une forme glacée puis se subliment dans la thermosphère pour fournir une source de molécules de H₂O.

Le H₂O est détruit par la suite par photolyse selon les schémas suivants :



Ces deux mécanismes qui ont été proposé par De More et al. 1982 explique la régulation de l'abondance du CO et de CO₂ dans l'atmosphère de Titan. Les modèles photochimiques montrent ainsi que la majeure partie de la photolyse du CH₄ a lieu dans la mésosphère.

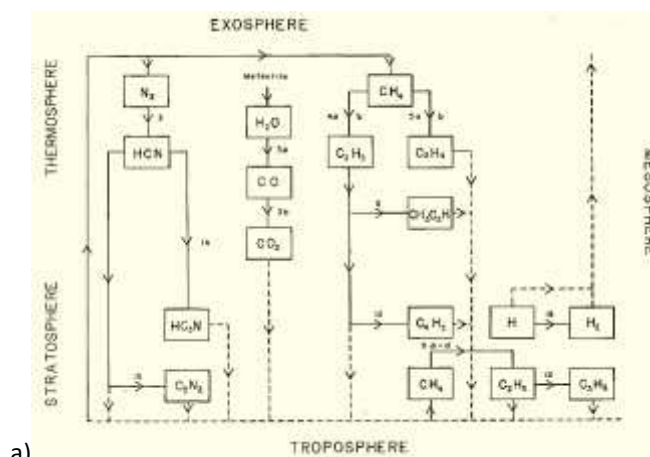
d- Conclusion : Réseau du modèle photochimique de l'atmosphère de Titan.

Une représentation simplifiée de la photochimie atmosphérique de Titan est donnée en annexe (Document 11 : Figure.7 (ChapIII) I-1.c). Elle montre la progression présumée à partir de molécules plus simples (CH₄, N₂) à des molécules plus complexes et éventuellement à des particules qui peuvent se sédimenter dans l'atmosphère. Par sa complexité, ce réseau chimique de l'atmosphère de Titan a servi de modèle de référence pour élaborer celui de l'atmosphère de Triton. Malgré la similitude entre les éléments observés, ces deux atmosphères se différencient

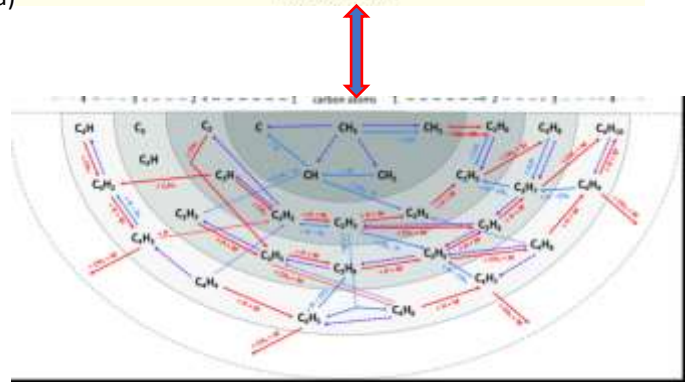
très nettement par leurs espèces chimiques prépondérantes et aussi par certains processus réactionnels. En effet sur Titan, ce sont les espèces moléculaires qui dominent telles que : (N_2 , CH_4 , H_2 ..) alors que sur Triton ce sont les espèces atomiques qui dominent telles que C^+ , N^+ . Toutefois, la photolyse du méthane joue un rôle important dans l'atmosphère de Triton. Ces réactions sont source d'hydrogène (moléculaire et atomique), mais aussi de radicaux comme il a été montré dans le modèle photochimique de Titan. À la différence dans le modèle de Titan, la présence d'espèces ioniques dans la basse atmosphère de Triton induit des réactions de dissociation supplémentaires du méthane CH_4 . Ainsi plusieurs groupes de réactions supplémentaires ont été considérés dans l'atmosphère de Triton.

- Photo- et électro-ionisation/dissociation de N_2 qui produisent des ions N_2^+ , N^+ mais également de l'azote atomique (N).
- Des réactions qui impliquent l'azote atomique et celles qui impliquent le monoxyde de carbone (CO).

Les deux figures ci-dessus présentent les deux modèles photochimiques de Titan et Triton en y faisant apparaître les différences et montre la complexité de la chimie au sein de ces atmosphères.



a)



b)

Figure.1 (Chap.III) I-2.c : (YUNG, ALLEN, AND PINTO :1982) :Schéma montrant comment les espèces observées sont liées aux molécules mères N_2 , H_2O et CH_4 , et entre elles. b) Schéma montrant l'ensemble des processus photochimique liés aux hydrocarbures. (Extrait d'ACS Chimie de la Terre et de l'Espace : composition de l'atmosphère de Titan 2024)

Remarque : La majorité des composés photochimiques (sauf C_2H_4) est perdue par condensation entre 50 et 100 km d'altitude (Anderson and Samuelson, 2011).

2. La Formation de molécules plus complexe : Exemple du Benzène ⁽⁹⁾ :

Nous venons de voir quelques exemples de processus réactionnels du réseau du modèle photochimique impliquant quelques molécules simples comme l'azote moléculaire (N₂) et les composés tels que le méthane (CH₄), les hydrocarbures gazeux éthane (C₂H₆), nitriles (cyanure d'hydrogène (HCN), ou encore l'eau (H₂O). Toutefois, des molécules plus complexes telles que, le benzène (C₆H₆) a été détecté pour la première fois dans l'atmosphère de Titan par *Coustenis et al. (2003)*. Parmi ces molécules, il est montré que des molécules polycycliques aromatiques (HAP) sont des composés essentiels dans la formation des brumes organiques de Titan et sont également des constituants potentiels de la matière organique à la surface de Titan (*Wilson & Atreya 2004 ; Imanaka et al. 2004 ; Coustenis & Hirtzig 2009*). D'après l'analyse des données recueillies par le spectromètre de masse de Cassini, il semblerait que le benzène pourrait se former dans l'ionosphère de Titan via des réactions ion-molécules. (*Vuitton et al. 2008*). Toutefois l'origine de la molécule de Benzène n'est pas encore tout à fait résolue par les astronomes. Compte tenu de la très faible température de 94 K mesurée à la surface de Titan, les scientifiques pensent que les réactions de chimie thermique classique des molécules sont peu probables sur des molécules solides. Certains auteurs comme Sagan & Thompson (1984) ont souligné à l'époque que des particules très énergétiques comme les rayons cosmiques pouvaient profondément pénétrer la basse couche atmosphérique pour initier des réactions grâce à l'énergie cinétique transportée par ces particules hautement énergétiques. Il est par conséquent tout à fait naturel d'imaginer des expériences de simulation en laboratoire pour la formation du benzène (C₆H₆) à partir d'électrons énergétiques. En 2009, une équipe Li Zhou et Weijun Zheng ont montré par des expériences en laboratoire et de calculs de structure électronique qu'il était possible de former la molécule de benzène à partir de glace acétylène (C₂H_{2(s)}) traitée ⁽¹⁰⁾ par des rayons cosmiques (électrons assez énergétiques) à basse température. L'expérience a été réalisée avec des électrons d'énergie cinétique de 5 keV (similaires aux particules cosmiques similaires aux flux solaires) entrant en contact avec la glace d'acétylène pour la formation du benzène. Plusieurs molécules se sont formées dont le benzène (C₆H₆), le vinylacétylène (C₄H₄) et son isomère du méthylèncyclopropène (C₄H₄). (*Voir annexe Doc 12 : Figure .8 (ChapIII) II-1.d: représentation des molécules (C₆H₆) et (C₄H₄)*). Elles ont été identifiées grâce aux données de spectrométries de masse et infra-rouge. D'après des calculs de structure électronique, certains ils suggèrent que la réaction globale ou bilan conduisant au benzène serait la suivante : $3 \text{ C}_2\text{H}_2 \text{ (s)} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_6 \text{ (g)}$. En comparant leurs résultats à ceux obtenus à la surface de Titan, ces auteurs arrivent à la conclusion que la formation du benzène initiée par les rayons cosmiques à la surface de Titan pourrait être la source dominante de benzène.

Toutefois d'autres auteurs comme *Dobrijevic et al (2016)* suggèrent le benzène est principalement formé en haute altitude vers 900 km par recombinaison électronique des ions

⁽⁹⁾ Le plus simple des hydrocarbures aromatiques de formule C₆H₆ (molécule plane à 4n+2 électrons délocalisable selon la règle de hückel avec « n » un entier)

⁽¹⁰⁾ glaces d'acétylène de 286 ± 10 nm d'épaisseur préparées à des différentes températures de 10 K, 30 K, 50 K et 67 K et irradiées avec des électrons énergétiques à flux constant pendant 1h, puis réchauffés à une vitesse de 0,5 K minute⁻¹ à 300 K. (*Bennett et al., 2005*)

$C_6H_7^+$ (molécule n'existant pas en solution aqueuse par exemple). En dessous de 400km, d'après *Vuitton et al (2019)* le benzène serait principalement produit par les deux réactions radicalaires collisionnelles suivantes et serait également détruite par d'autres réactions radicalaires en-dessous de 1000km :

→ Réaction de production à 900km.

$C_2H_3^{\bullet}(g) + C_4H_3^{\bullet}(g) + M \mapsto C_6H_6(g) + M$ où « M » représente une autre molécule N_2 ou CH_4 par exemple.

$2 C_3H_3^{\bullet}(g) + M \mapsto C_6H_6(g) + M$

→ Réaction de perte de benzène en dessous 1000km par des réactions de photodissociation d'une liaison C-H qui formerait le radical « $C_6H_5^{\bullet}$ » à basse altitude selon l'équation :



II- QUE NOUS DISENT LES MODÈLES DE SPECTRES DE MASSE PAR RAPPORT AUX MOLÉCULES DÉTECTÉES ?

Comment extraire l'information, c'est-à-dire la composition chimique et la concentration des espèces ? (Le lecteur pourra compléter sa lecture en annexe sur la partie « lire un spectre »)

La compréhension du spectre d'une atmosphère planétaire nécessite en général de pouvoir modéliser correctement celui de ses différents composés (molécules, aérosols, ...)

Il est d'usage de reproduire le spectre observé avec un modèle chimique complet qui incluent de nombreuses réactions et des centaines d'espèces. Il est possible également d'appliquer des méthodes d'analyse statistique aux spectres observés en les comparant aux spectres de masse individuels de différentes espèces mesurées au laboratoire. Afin de vérifier la pertinence d'un modèle théorique ou de simulation, la démarche consiste à superposer au spectre expérimental le spectre modélisé par calcul numérique. (Voir figure 6 du spectre de masse ci-dessous)

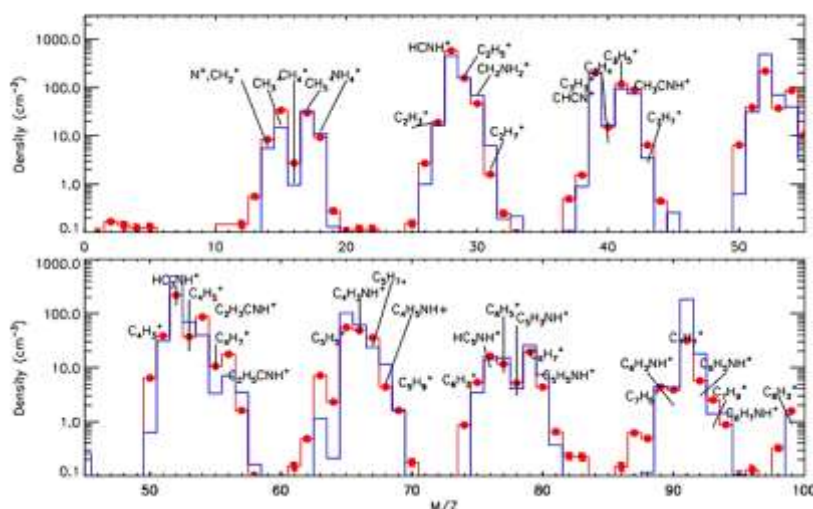


Figure.6 (Chap III) II : Spectre de masse Cassini/INMS (points reliés par des lignes rouges) et les points calculé (lignes bleues) à 1100 km. Reproduit de *Vuitton et al. (2019)*.

III- CONCLUSION : QUE NOUS DISENT LES MODÈLES PHOTOCHIMIQUES ?

Tout d'abord, il est désormais établi par différents modèles et observations que le principal constituant de l'atmosphère de Titan est l'azote. Le télescope spatial James Webb de la NASA a fourni pour la première fois la preuve de la présence du radical méthyle (CH_3^{\bullet} (g)) détecté sur Titan. (Source : *NASA, ESA, CSA et Elizabeth Wheatley 2023*) Parmi les composés identifiés à ce jour on trouve ⁽¹¹⁾ : CH_4 , H_2 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CH_3C_2H , C_3H_8 , C_4H_2 , HCN , HC_3N , C_2N_2 , CO , CO_2 ...

D'après les données recueillies, on suppose que la composition chimique globale de l'atmosphère de Titan est réductrice, avec un état d'oxydation intermédiaire entre celui des planètes terrestres et celui des planètes joviennes. Par ailleurs, l'abondance des composés organiques dans la stratosphère constitue un indice important sur le type de chimie qui pourrait se produire sur Titan. On suggère, qu'à l'aide de l'ensemble des preuves existantes, que l'atmosphère de Titan est d'un point de vue photochimique ⁽¹¹⁾ semblable à celle de Mars. En effet le méthane est détruit progressivement. Il est généralement admis que la plupart des composés observés sont dérivés de quelques molécules mères par des processus photochimiques. L'objectif du modèle photochimique est donc d'invoquer les voies de réaction chimiques connues pour expliquer quantitativement les abondances et notamment celle des espèces minoritaires. Pour élaborer un modèle chimique complet, il est important qu'il prenne en compte l'interaction entre la photochimie dans la haute atmosphère et la thermochimie dans la basse atmosphère selon *Prinn 1975 ; Lewis et Kreimendahl 1980*. Différentes tentatives de modèle ont été suggérées. Les modèles les plus simples visaient à comprendre la photochimie globale sur Titan en termes d'un petit nombre de cycles ou de schémas chimiques. Afin que le modèle élaboré puisse aider à la compréhension des réactions photochimiques, il est pratique de diviser la photochimie de l'atmosphère de Titan en deux régions, caractérisées respectivement par des processus primaires et photosensibilisés. Autrement dit, on distingue les processus qui se déroulent dans la thermosphère et la mésosphère, de ceux qui se déroulent dans la stratosphère.

⇒ Dans la thermosphère et la mésosphère la dissociation de N_2 , H_2O et CH_4 se produit par photolyse directe ou par impact électronique. Cela conduit à la production des espèces importantes HCN , CO , CO_2 , C_2H_2 , C_2H_4 et CH_3C_2H par des processus primaires.

⇒ Les processus photosensibilisés dans la stratosphère sont responsables de la production de C_2H_6 et C_3H_8 . La chimie stratosphérique peut également expliquer la présence de C_4H_2 , HC_3N et C_2N_2 . Dans le modèle photochimique les processus primaires dans la thermosphère et la mésosphère sont relativement bien définis. Tandis que les processus photochimiques secondaires dans la stratosphère sont plus complexes et ont donc plus de mal à être parfaitement définis. (*Yuk L. Yung et Mark Allen 1984*).

⁽¹¹⁾ De nombreuses réactions Photochimiques se produisent dans l'atmosphère de Mars. Exemples : la photodissociation du dioxyde de carbone en (CO et O) et la photodissociation de H_2O en hydrogène atomique par les rayonnements UV solaires.

Quelles conclusions se déduisent des modèles photochimiques ?

Les modèles nous apprennent que certaines molécules carbonées à liaisons insaturées telles que C_2H_2 , C_2H_4 , CH_3C_2H , C_4H_2 , HCN , HC_3N et C_2N_2 sont extrêmement réactives vis-à-vis des atomes d'hydrogène.

Ainsi à l'exception peut-être du C_2H_2 (acétylène) et du HCN (acide cyanhydrique), la plupart de ces composés peuvent être détruits par des réactions avec H . Le CH_4 étant la source ultime de tous les atomes de carbone, la production d'espèces carbonées plus complexes doit être accompagnée de quantités comparables de H ou de H_2 . Il semblerait que les observations associées à N_2 , N et N^+ ont conduit *Strobel et Shemansky (1982)* à conclure que la dissociation de N_2 se produit facilement dans la thermosphère à la suite d'interactions avec des électrons énergétiques d'origine magnétosphérique. Une estimation des concentrations maximales de certains composés avait été donnée (*Prinn et Fegley 1981*). Il en était ressorti que les abondances de la plupart des espèces mineures dépassent leurs pressions de vapeur saturées et devraient se condenser à la tropopause, ou même à la surface. Ainsi, la basse atmosphère ne peut pas être la source de molécules complexes pour la haute atmosphère, même si certaines molécules comme le HCN peuvent être abondantes à la surface et à l'intérieur de Titan (*Prinn et Fegley 1981*). Il est également admis qu'au-dessus de 750 km d'altitude les deux molécules N_2 et CH_4 sont forcément détruites dans la haute atmosphère, principalement par photodissociation par le rayonnement solaire. Cette destruction peut aussi être engendrée par les rayons cosmiques et les électrons chargés de la magnétosphère de Saturne. Par ailleurs l'oxygène qui a été détecté dans l'atmosphère de Titan ne peut provenir que de l'extérieur. L'hypothèse la plus probable consiste à dire que l'oxygène serait vraisemblablement dû à l'eau éjectée par les geysers d'Encelade (autre lune de Saturne) qui constitue la principale source d'ions oxygénés dans l'environnement de Saturne. Ainsi ces ions tels que les hydroxydes (HO^+) et la molécule d'eau proviendraient d'Encelade et se précipiteraient dans la haute atmosphère de Titan pour conduire à la formation des molécules H_2O , CO et CO_2 qui y sont détectées. ⁽¹²⁾

La chimie très complexe de l'atmosphère de Titan nous montre que toutes ces molécules formées par différentes voies chimiques sont certainement les molécules précurseurs à la formation des aérosols. Les différents modèles numériques et théoriques suggèrent que toutes ces molécules et radicaux vont probablement s'agglomérer entre eux pour former des macromolécules donnant lieu aux aérosols organiques de Titan.

Nous nous intéresserons dans ce qui suit aux modèles de formations des aérosols présents dans l'atmosphère de Titan. L'idée dans est de montrer le rôle important des simulations numériques et expérimentales, ainsi que les modèles physico-chimiques qui permettent de comprendre et de former des analogues organiques comme les Tholins.

¹² Le tableau doc.8 donne une idée de la composition chimique actuelle de l'atmosphère de Titan. (Tableau : Chap II-document 8)

IV- LES MODÈLES PHYSICO-CIMIQUES DE FORMATION DES AÉROSOLS.

1- Diagramme illustrant les différentes séquences de réactions chimiques conduisant à la formation des aérosols de Titan.

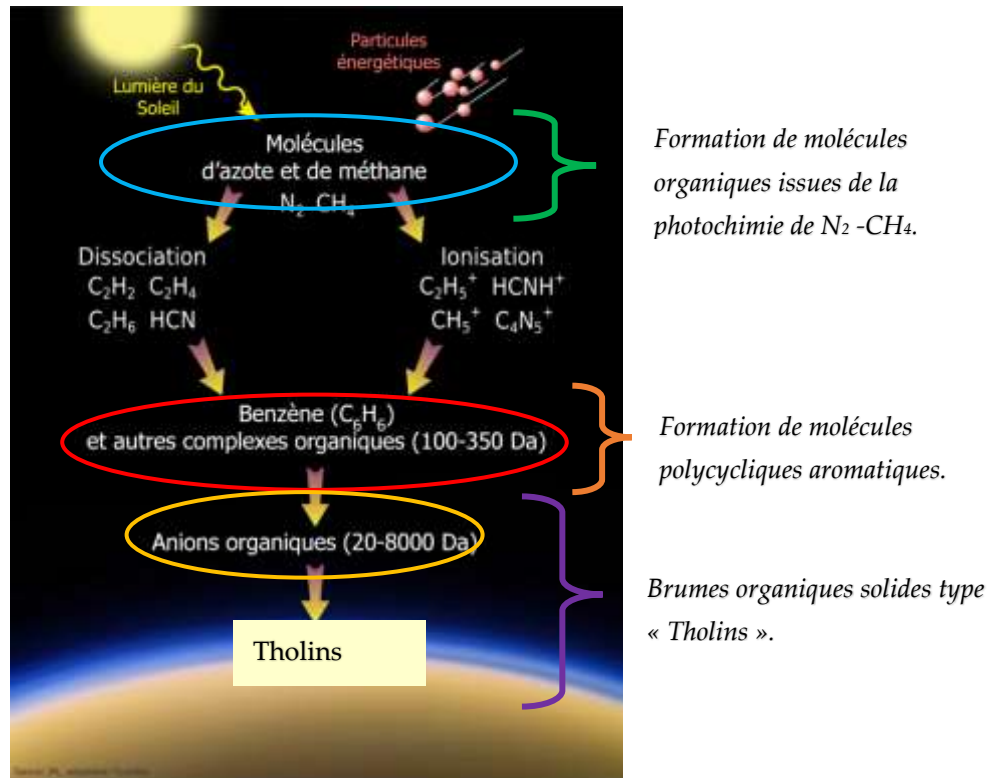


Figure 2: Chap III-IV-1 Diagramme illustrant la formation des aérosols de Titan. (Image extraite de la Nasa Jet Propulsion Laboratory) Crédit : adapté de Waite et al. (2007)

2- Quelle est la démarche scientifique ?

Grâce à la mission Cassini-Huygens, la formation des aérosols dans l'atmosphère et leur sédimentation à la surface est de mieux en mieux comprise aujourd'hui. La formation des aérosols débute dès la Thermosphère et l'Ionosphère, autrement dit au-dessus de 650 km d'altitude grâce à la photochimie (photolyse UV) assurée par le rayonnement solaire, par des rayons cosmiques et aussi par l'impact des électrons de très hautes énergies provenant de la magnétosphère de Saturne. Les scientifiques se sont demandés, comment des macromolécules gazeuses produites à de telles altitudes (>1000 km), peuvent former des agrégats solides contenant des milliers de monomères sphériques.

Pour cela il a fallu avoir plusieurs démarches différentes :

- Les observations dans différentes gammes de longueurs d'onde.
- Les simulations numériques.
- Les modèles physico-chimiques.
- La simulation expérimentale en laboratoire.

D'après les différents modèles établis, il semble se dégager trois sources principales de formations d'aérosols :

- La chimie ionique neutre au-dessus de la Thermopause,
- La nucléation homogène dans la Mésosphère et la Thermosphère,
- Et l'adsorption physico-chimique dans la Mésosphère et la Thermosphère.

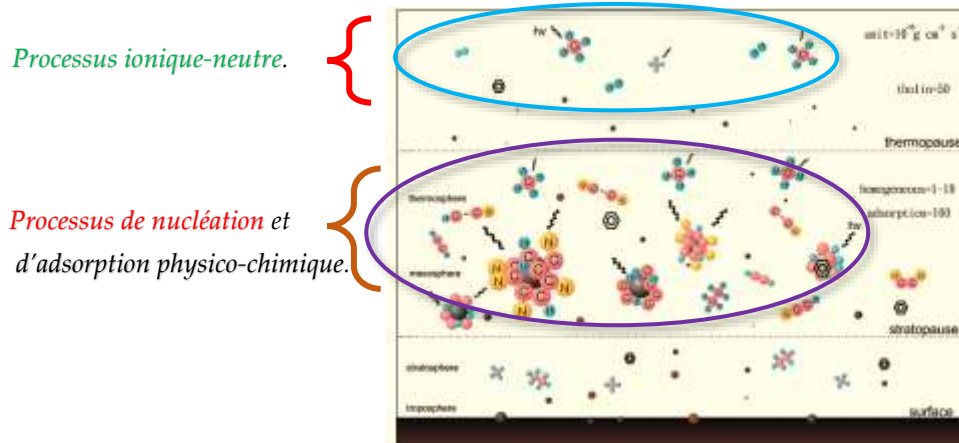


Figure-1.a Chap III-IV-2 : Schéma (pas à l'échelle) de la chimie de la phase gazeuse à des processus de formation des aérosols dans l'atmosphère de Titan.

3- Quels modèles physico - chimiques pour les aérosols de Titan ?

Des modèles photochimiques existent pour tenter de reproduire numériquement les processus de formation des aérosols. Cependant reproduire cette croissance de manière précise et en prenant en compte tous les phénomènes en jeu s'avère être compliqué.

On distingue deux types de modèles physicochimiques :

- Soit les modèles homogènes avec une description soignée des réactions chimiques en phase gazeuse mais avec la difficulté de mettre en évidence les éléments importants pour la formation des aérosols (*Loison et al. 2015*).
- Ou soit les modèles hétérogènes, basé sur la théorie microphysique des aérosols (*Rannou et al. 2004*).

On se propose dans ce qui suit de décrire quelques démarches qui permettent d'aboutir à certains modèles. Ils ont tous pour objectifs de faire la lumière sur la formation des aérosols dans les atmosphères d'azotes & méthane telle que celle de Titan. On se focalisera sur quelques démarches s'appuyant sur les modèles théoriques type microphysique des atmosphères dans une première partie et on présentera dans une deuxième partie quelques approches expérimentales (Expérience Pampre) qui visent à mettre en œuvre des analogues aérosols (type Tholins).

4- Modèle hétérogène basé sur la théorie de la microphysique des brumes.

Nous ne développerons pas sur le plan théoriques ces différents modèles dans le cadre de ce travail. Nous allons en revanche montrer comment il est possible de l'appliquer dans la formation des brumes organiques en faisant des hypothèses sur la morphologie des aérosols.

➤ **Quelles sont les Hypothèses de formation pour élaborer un tel modèle ?**

Tout d'abord avant de concevoir un modèle quelconque, il est essentiel de conjecturer. Il est donc crucial de recueillir en amont des données observationnelles. Nous savons que les aérosols constituant la brume de Titan sont produits à haute altitude suite à la photodissociation de l'azote et du méthane, qui conduit à la formation de molécules photochimiques de plus en plus complexes. (*Delitsky & McKay, 2010; Trainer et al., 2013; Sciamma-O'Brien et al., 2014; Sebree et al., 2014*).

Avec les missions Pioneer 11 et Voyager 2, des mesures de photopolarimétrie et de photométrie furent possibles, on a pu évaluer ainsi les tailles probables des particules intervenant dans les brumes organiques. Rappelons les résultats des premières observations et des premières simulations qui ont été réalisées.

Ces résultats étaient nécessaires dans l'élaboration d'un modèle de formation.

➤ **Que nous disent les observations :**

- Des particules sphériques de petites tailles ($< 0,02 \mu\text{m}$) permettent d'expliquer les observations dans l'UV ($\lambda < 300 \text{ nm}$).
- Des particules plus grosses ($0,1-0,5 \mu\text{m}$) rendent compte des observations dans le proche UV, le visible et l'infrarouge.
- Les mesures obtenues par DISR (Descent Imager/Spectral Radiometer) confirment la nature fractale des agrégats de particules d'aérosol, composés de 3000 monomères de rayons $0,04 \mu\text{m}$ (*Tomasko et al., 2008, 2009*).
- Ces ensembles de fractales ainsi formés par agrégat ont probablement une dimension typique de l'ordre $0,7 \mu\text{m}$.
- Les instruments VIMS (Visible and Infrared Mapping Spectrometer) et CIRS (Composite Infrared Spectrometer), tous les deux des spectromètres IR en absorption, ont apporté les premières informations sur la signature chimique des aérosols.
- De plus, on a pu détecter des ions négatifs lourds dans la haute atmosphère ($z \geq 1000 \text{ km}$) par l'instrument CAPS (Cassini Plasma Spectrometer). On a ainsi pu identifier ces ions, de masse $m/z \geq 100 \text{ Da}$ (*Dalton*)⁽¹³⁾, comme étant des embryons d'aérosols pouvant petit à petit croître grâce à l'interaction avec les ions positifs environnants. Les données collectées montrent une croissance de leur masse à mesure que l'on descend dans l'atmosphère.

➤ **Que nous apprennent les modèles par simulations numériques ?**

Les simulations numériques de la chimie atmosphérique prédisent que la molécule de benzène (C_6H_6), le cycle aromatique le plus simple constituerait les premières briques élémentaires pour former un ensemble de molécules plus grosses contenant plusieurs cycles aromatiques. (*Delitsky & McKay ; Sebree et al., 2014*). Elles peuvent probablement se lier entre elles sous forme de feuillets. Puis elles s'agglomèrent entre elles ou avec d'autres molécules par collisions en

⁽¹³⁾ Le dalton (Da) (masse de l'isotope 1 de l'hydrogène) : $1 \text{ Da} = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,007 \text{ uma}$ (unité de masse atomique)

formant de nouvelles particules dans la haute atmosphère. Ensuite petit à petit, des particules sphériques se forment de plus en plus grosses par collision ou par accumulation de molécules. Il est alors possible de former d'autres particules assez petites et de tailles différentes. Les molécules sphériques de petites tailles qui en résultent sont appelées « monomères » de taille comparable d'environ $0,05 \mu\text{m}$. Ces monomères continuent de croître par collisions puis se collent les uns aux autres pour former des agrégats avec de plus en plus de monomères jusqu'à contenir plusieurs milliers de monomères. Certains auteurs ont montré que les aérosols formés à des altitudes élevées ont un temps de coagulation plus court que leur temps de sédimentation, ce qui leur permet de croître rapidement jusqu'à des rayons de quelques dizaines de nanomètres. Dans la zone de formation ($> 500 \text{ km}$), la croissance des aérosols suit le mode d'agrégation particule-agrégat, tandis qu'en dessous, le mode agrégat-agrégat prédomine. Il est montré par ces simulations que la dimension fractale des agrégats dépend de leur mode de formation.

Ainsi deux modes de collection types peuvent être identifiés d'après les observations :

- Le mode particule-agrégat.
- Et le mode agrégat-agrégat.

Ces deux modes ont été étudiés pour des déplacements de particules en mouvement brownien et dans un régime balistique par *Witten & Sander (1981); Meakin (1984); Jullien (1984)*.

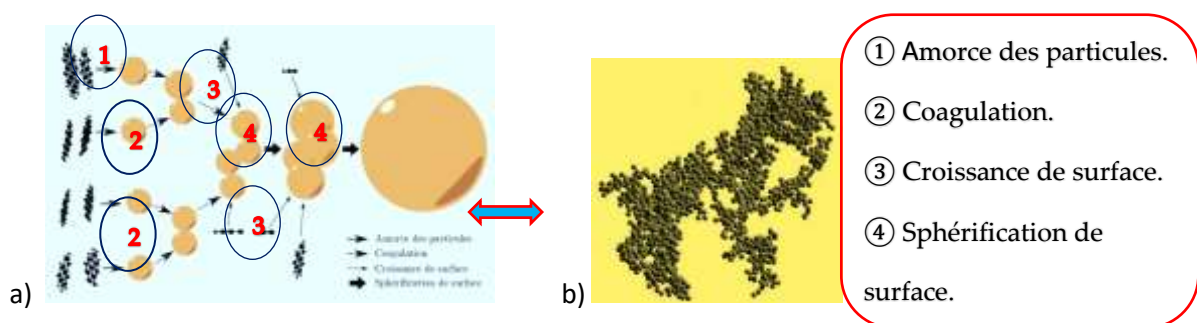


Figure 2. (Chap III-IV-3 a) Formation des précurseurs des aérosols par coagulation. (Mode particule - agrégat) Extrait de (Lavoas, Sander, et al., 2011).

b) Illustration d'agrégats composés de petits monomères qui pourraient constituer les aérosols de Titan Crédit : Skorov et al. (2010)

En 2009 *Tomasko et al.* ont développé un modèle qui utilise comme données d'entrée un ensemble de particules sous forme d'agrégat fractal avec différentes tailles de monomères. Puis ils les ont ensuite comparés à la polarisation qui en résulte avec celle observée par DISR. Ces agrégats seraient constitués d'environ 4300 monomères d'un rayon moyen de $0,04 \mu\text{m}$ entre 150 km d'altitude et la surface de Titan selon leur modèle numérique. Cette hypothèse de formation par des monomères a été corroborée dans le cas de molécules de benzène (C_6H_6). En effet, du Benzène a été détecté à 1000 km au-dessus de la surface de Titan avec une abondance non négligeable (*expérience ACP (Aerosol Collector Pyrolyzer) embarqué sur la sonde*

Huygens). De plus des macromolécules ont été produites à partir du benzène dans l'expérience Pampre. (*Szopa, Cyril ; Carrasco 2012*)

➤ **Description succincte du modèle théorique de la microphysique classique des brumes.**

Dans une démarche scientifique, il est important de pouvoir donner une dimension scientifique aux observations et aux simulations. Pour cela, on établit des modèles théoriques qui doivent permettre de prédire l'évolution d'un système selon les conditions expérimentales. Cela favorise ainsi une meilleure interprétation des données recueillies lors des observations ou des expériences réalisées.

➤ **Une approche théorique du modèle microphysique.**

Comment modéliser l'évolution temporelle de la distribution des particules dans l'atmosphère ?

Pour cela un modèle physique dit « microphysique » a été développé par Cabane et al. (1992 ; 1993). Il est basé sur une approche Eulérienne de la production et de la croissance des aérosols. Le processus d'agrégation élaboré par Cabane et al dans son modèle conduit à des agrégats fractals selon le mode de croissance agrégat-agrégat.

Tout d'abord rappelons ce qu'est une approche Eulérienne. Elle est prise en compte lors des études cinématiques des fluides c'est-à-dire lorsqu'on cherche à décrire les écoulements ou mouvement d'un fluide sans se préoccuper des causes dont ils résultent.

Pour se faire, il existe deux types d'approches que nous rappelons brièvement ci-dessous :

- Une approche dite « Lagrangienne (*Lagrange : 1736-1813*) » dans laquelle on suit une particule de fluide dans son mouvement. Autrement dit, on suit la même particule en des points de l'espace différents et à des temps différents. On s'intéresse ainsi à la trajectoire de la particule.
- Et une approche « Eulérienne (*Euler : 1707-1783*) » dans laquelle on s'intéresse à un point fixe de l'espace et on regarde défiler plusieurs particules de fluides différentes à des instants différents.

Ainsi l'approche Eulérienne permet une description du mouvement d'ensemble du fluide en des points fixes de l'espace à différents instants. L'approche Eulérienne décrit l'état d'un fluide en mouvement en lui associant des champs : champ des vitesses, champ de pression, champ de température, de concentrations de particules... Dans l'atmosphère de Titan, on suppose que les particules peuvent croître et évoluer à l'aide de plusieurs processus microphysiques. Le modèle doit donc tenir compte des observations qui ont montré que la croissance des aérosols peut être décrite en deux étapes :

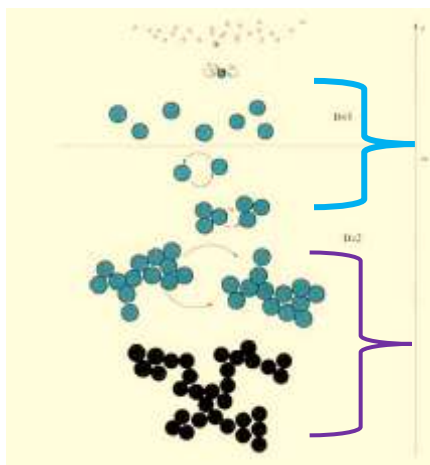
⇒ Une première étape tient compte de l'altitude à laquelle se produisent les espèces formant les aérosols par voie photochimiques. Puis accréation par collisions de petites particules (1 nm

à 0,1 μm) entre elles conduisant à la formation de particules sphériques compactes « les monomères ». De plus, la taille des monomères dépend de l'altitude de production photochimique estimé entre 350 km et 500 km.

→ La deuxième phase est une phase de sédimentation dans l'atmosphère qui débutent seulement lorsque les monomères ont atteint une taille suffisante. Au cours de cette sédimentation, la taille des aérosols augmente par un processus de croissance agrégat-agrégat. Or le modèle classique de la microphysique des atmosphères est régi par certaines lois qui prend en compte divers processus tels que :

- Coagulation
- Coalescence
- Sédimentation
- Et de diffusion turbulente.
- Et des conditions photochimiques de production.

Ces deux phases suggérées par les modèles sont résumées et illustrées sur le schéma ci-dessous.



1^{ère} étape :

→ Formation des molécules Mères par réaction photochimique en haute altitude.
 → *Formation des monomères* par coagulation et coalescence.

2^{ème} étape :

→ *Phase de Sédimentation* et de *diffusion des agrégats*.
 → *Aérosols formés sous forme de Structures Fractales*.

Figure.3 ((Chap III-IV-3 – Mécanisme de formation des aérosols en deux étapes. (Schéma extrait de la Thèse de Belloucci 2008).

Dans la zone de production, les aérosols sont des sphères de tailles très hétérogènes. En dessous de l'altitude de formation, les monomères sphériques ont tous à peu près la même taille et s'agrègent entre eux pour former des structures fractales.

Ces processus vont forcément avoir une influence sur la concentration ou densité $C(r, z, t)$ des particules formant les aérosols. $C(r, z, t)$ représente donc la concentration de particules de rayon r à l'altitude z .

Dans cette approche Eulérienne, on montre que le champ de concentration $C(r, z, t)$ est modélisé par l'équation (1) ci-dessous qui traduit le taux de variation « $\frac{\partial C(r,z,t)}{\partial t}$ » de la

concentration ($C(r,z,t)$) des aérosols en fonction des taux de variations correspondant à chaque processus du modèle microphysique pris individuellement. (Bruno Batz 2024)⁽¹⁴⁾

$$\frac{\partial C(r,z,t)}{\partial t} = Q(z,t) + \frac{\partial C(r,z,t)}{\partial t}_{\{transport\}} + \frac{\partial C(r,z,t)}{\partial t}_{\{Collection\}} + \frac{\partial C(r,z,t)}{\partial t}_{\{cond/Evap\}} \quad (1).$$

⇒ Le terme « $Q(z)$ » traduit la production des particules de brume par les réactions photochimiques. Autrement dit, il correspond aux nombres de particules créées par unité de volume et de temps en fonction de l'altitude.

⇒ Le terme « $\frac{\partial C(r,z,t)}{\partial t}_{\{transport\}}$ » traduit le déplacement des particules. Il prend en compte les phénomènes de sédimentation, de transport sous l'effet de la gravité et du transport dynamique dans l'atmosphère.

⇒ Le terme « $\frac{\partial C(r,z,t)}{\partial t}_{\{Collection\}}$ » correspond à la croissance des particules par collection qui prend en compte les phénomènes de coagulation (*collection par mouvement brownien*) et de coalescence (*collection par mouvement gravitationnel*).

⇒ le terme « $\frac{\partial C(r,z,t)}{\partial t}_{\{cond/Evap\}}$ » traduit la croissance des particules par les phénomènes de condensation et d'évaporation.

Ce type de modèle Eulerien permet une description complète de la distribution des aérosols et permet de suivre son évolution temporelle.

➤ **Nature et régime d'écoulement particulaire :**

Tout d'abord un écoulement est un phénomène de transport puisqu'il s'agit d'un transfert de masse de particules. C'est pourquoi il est naturel d'introduire la notion de concentration de particules. Toutefois l'étude du transport de molécules nécessite que l'on tienne compte en général de sa nature. Par analogie à l'étude des écoulements de fluide pour lesquels il existe deux natures d'écoulements soit un écoulement turbulent ou soit un écoulement laminaire. Ces deux natures d'écoulements sont définies à partir d'une grandeur physique appelée : nombre de *Reynold* noté « *Re* » qui est défini de la façon suivante :

$$Re = \frac{\text{Transfert de quantité de mouvement par convection}}{\text{Transfert de quantité de mouvement par diffusion}}$$

On définit classiquement en mécanique des fluides 2 régimes d'écoulements selon les valeurs de *Re*.

- Pour un grand nombre de Reynolds ($Re \gg 1$), l'écoulement est dit Turbulent dans ce cas, c'est le transport de quantité de mouvement par convection qui prédomine par rapport au transport par diffusion.

⁽¹⁴⁾ (Voir « Thèse Bruno Batz 2024 »)

- Pour un écoulement à faible nombre de Reynolds ($Re < 1$), il est dit Laminaire, c'est le transport de quantité de mouvement par diffusion qui prédomine par rapport au transport par convection.

Il est montré que la microphysique des atmosphères est régie par des lois similaires.

Dans notre cas, on peut définir en plus une autre grandeur physique qui caractérise le régime de transport des particules. C'est un nombre sans dimension appelé « nombre Knudsen noté K_n » permettant de caractériser le régime d'écoulement en terme de continuité du milieu et non en terme de turbulent. Ce régime peut être décrit ici par l'équation de continuité (1).

Rappelons tout d'abord pourquoi il convient d'introduire « K_n » dans le modèle théorique présenté précédemment.

- **Qu'est - ce qu'un modèle continu ?**

En physique le modèle continu qui permet de d'écrire un fluide peut se faire selon plusieurs approches que nous ne développerons pas en détails ici. Toutefois voici un résumé des points essentiels qu'il convient de prendre en considération. Un fluide peut être décrit selon :

- Soit une approche « par la dynamique moléculaire » dans laquelle, on cherche à décrire le comportement de « N » molécules en résolvant de façon numérique les équations de la mécanique du point appliqué à N corps. (*Utiliser dans le cas de la simulation numérique*)
- Soit une approche « du milieu continu » dans lequel on définit une grandeur appelée le libre parcours moyen noté « ℓ » (*distance moyenne parcourue par une particule de fluide entre deux chocs successifs*).
- Soit une « approche statistique » lorsque le libre parcours moyen « ℓ » est du même ordre de grandeur devant l'échelle macroscopique « L ».

En général, l'étude des écoulements repose en physique sur l'approche du milieu continu.

On distingue alors trois échelles différentes pour les étudier.

- L'échelle macroscopique de dimension « L ».
- L'échelle des collisions : lorsque $\ell \ll L$, à cette échelle, les grandeurs physiques varient de façon discontinue et imprévisible.
- L'échelle mésoscopique « a » : définit par $\ell \ll a \ll L$, on choisit alors de décrire le fluide à une échelle intermédiaire entre l'échelle atomique et l'échelle macroscopique. Ainsi à cette échelle, on peut définir les grandeurs locales continues telles que la concentration des particules. Ici la taille d'une particule correspond à celui d'un petit agrégat et non celle d'une molécule. On définit alors dans l'approximation d'un milieu continu, un nombre qui permet de caractériser le régime de l'écoulement, il est appelé « nombre Knudsen : K_n » et est défini de la sorte :

$$K_n = \frac{\text{libre parcours moyen des particules}}{\text{Dimension caractéristique}} = \frac{\ell}{L} .$$

Il peut être défini dans ce modèle par : ⁽¹⁵⁾

$$K_n = \frac{\ell}{L} = \frac{k_B T}{4 \sqrt{2} r_p^2 P} \times \frac{1}{r_p}$$

Avec « ℓ » le libre parcours moyen des particules dans l'atmosphère, k_B la constante de Boltzmann ($k_B = 1,380649 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$), P la pression et « r_p » représente le rayon moyen des particules étudiées. En effet la taille des monomères augmente lorsque l'altitude de production diminue, donc leur taille dépend de la pression locale. Il est ainsi possible de distinguer trois types de régimes en fonction des valeurs de K_n . ⁽¹³⁾

- Si $K_n \gg 1$: la trajectoire des particules est considérablement influencée par des collisions avec les molécules voisines provoquant un mouvement aléatoire. C'est donc l'agitation moléculaire qui domine l'écoulement (*Mouvement Brownien*). Autrement dit le libre parcours des particules est plus grand que le rayon moyen des particules. Ce régime est dit régime « *Moléculaire ou régime Balistique* ».
- Si $K_n \ll 1$: l'écoulement est considéré comme continu. La distance parcourue par une particule entre deux collisions successives est très faible devant la taille de la particule. La particule voit ainsi son environnement comme un fluide. Ce régime est dit régime « *Hydrodynamique ou Fluide* ».
- Si $K_n \approx 1$: il s'agit d'un régime d'écoulement intermédiaire pour laquelle la taille des particules étudiées est du même ordre que celui du libre parcours moyen d'une particule de fluide. De ce fait le milieu ne peut plus être considéré comme continu. Il s'agit d'un régime transitoire.

Il est alors nécessaire d'apporter des corrections au modèle afin de tenir compte de l'interaction entre les particules et les molécules de gaz de l'atmosphère.

Cette correction permettra d'ajuster par exemple la vitesse de sédimentation des particules dans le régime Hydrodynamique ($K_n \ll 1$). (*Pruppacher & Klett, 2004*)

➤ **Discussion du modèle pour l'atmosphère de Titan :**

- **Que prévoit le modèle pour les régimes d'écoulement dans le cas des aérosols de Titans ?**
Ces trois régimes d'écoulement doivent être pris en compte afin de décrire la formation des brumes organiques par le modèle microphysique car ces trois régimes sont bien présents dans les 500 premiers km de l'atmosphère de Titan.
De plus compte tenu de la grande plage de rayon couverte par la loi de distribution de Titan, il est nécessaire que les ajustements soient pris en compte pour le régime transitoire dans le modèle microphysique. On peut déduire la nature de l'écoulement ici en

⁽¹⁵⁾ (Voir « Thèse *Bruno Batz 2024* »)

comparant les forces d'inertie aux forces de frottements visqueux autour d'une particule. Le nombre de Reynolds s'écrit alors

$$Re = \frac{\text{Terme relatif aux forces d'inertie}}{\text{Terme relatif au frottement visqueux}}$$

Dans le cas où les forces de frottement visqueux dominent, l'écoulement est gouverné par la viscosité c'est-à-dire pour les petits nombres de Reynolds ($Re \ll 1$), nous parlerons du régime de Stokes (*ou régime laminaire*). Alors la vitesse de sédimentation dépend de la dimension caractéristique des agrégats. À l'inverse, lorsque les forces d'inertie dominent ($Re \gg 1$) le régime laminaire devient instable et voir turbulent. Nous sommes dans le cas de régime turbulent, alors la vitesse des agrégats en un point M de l'atmosphère varie dans le temps de façon erratique. Ainsi sur Titan, on fait l'hypothèse que le nombre de Reynolds des particules atmosphériques est suffisamment faible pour que nous puissions considérer que l'écoulement est de nature non-turbulent. Par conséquent le modèle montre que la vitesse est directement proportionnelle au rayon de la particule pour un agrégat de dimension fractale $D_f = 3$. En revanche pour un agrégat de dimension fractal¹⁶ $D_f = 2$, la vitesse dépend seulement de la dimension d'un monomère.

- **Que prévoit le modèle par rapport à la sédimentation dans le cas des aérosols de Titans ?**

Par ailleurs, la dimension fractale des aérosols a été prise en compte dans les calculs des forces de frottement, comme décrit dans *Cabane et al. (1993)* car sinon la vitesse de chute des particules dépendrait de K_n . En effet K_n varie trop fortement avec l'altitude, il serait par conséquent impossible de faire des approximations pour ce nombre afin de caractériser l'écoulement. Compte tenu de cette prise en compte de la dimension fractal dans le modèle, il est possible de caractériser l'écoulement selon K_n pour l'atmosphère de Titan. (*Cabane et al. (1993)*)

⇒ Ainsi lorsque le régime est moléculaire ou balistique ($K_n \gg 1$), il est possible de modifier l'expression de la vitesse des particules dans le modèle. Alors pour tous les agrégats de dimension fractale $D_f = 2$, on montre que la sédimentation se fait à vitesse constante quel que soit leur rayon. Et pour une particule sphérique ($D_f = 3$), la vitesse est directement proportionnelle au rayon de la particule.

⇒ Dans le cas où $K_n \ll 1$ c'est-à-dire pour le régime hydrodynamique, en comparant cette fois le poids de la particule et la force de Stokes dans le modèle, il est montré que pour $D_f = 3$, l'expression de la vitesse de sédimentation d'une particule sphérique est proportionnelle au carré de son rayon. Tandis que pour une particule de dimension fractal

¹⁶ Une figure fractale est un objet mathématique qui présente une structure similaire à toutes les échelles. La dimension fractale D_f est une grandeur qui traduit ici la façon dont la géométrie des agrégats remplit l'espace à toutes les échelles. (wikipedia.org)

$D_f = 2$, il est montré que la sédimentation se fera plus lentement qu'une particule sphérique de volume équivalent. (*Pruppacher & Klett, 2004*)

- **Que prévoit le modèle pour les processus de collection et de coagulation dans le cas des aérosols de Titan ?**

Le principe de collection est basé sur le fait que lors d'une collision entre deux particules, il est probable que la collision soit constructive c'est-à-dire qu'elle mène à la formation d'une particule de taille plus grande ou d'un agrégat de particules.

Ce principe de collection dépend forcément de la vitesse relative des particules qui se choquent. On distingue alors deux types de collection :

- La collection par coagulation est due par les collisions entre particules du fait de leur agitation moléculaire (*Mouvement Brownien*). C'est le premier principe de processus de formation de particules par collision. (*Fuchs, 1964*). Ce type de collection sera favorisée dans le cas d'un régime d'écoulement de type « moléculaire ou balistique » ($K_n \gg 1$).
- La collection par coalescence est le deuxième processus de formation par collision. Elle est due à des différences de vitesse entre les particules lors de leur chute.

Il est montré que c'est le mode de coagulation qui prédomine sur Titan par rapport au mode de collection par coalescence. Dans la stratosphère de Titan (haute altitude), pour les agrégats fractals de dimension $D_f = 2$, la sédimentation se fait à vitesse constante quel que soit leur rayon. En ce qui concerne la troposphère, il est montré que c'est le mode de collection par coalescence qui semble là aussi être négligeable devant le mode de coagulation.

Chapitre IV : Comment reproduire au laboratoire les analogues d'aérosols de Titan ?

L'activité chimique dans l'atmosphère de Titan est si intense qu'elle mène à la formation de fines particules solides de composés organiques, à partir du méthane (CH_4) et du diazote (N_2). Les aérosols organiques qui se forment dans l'atmosphère de Titan se déposent et s'accumulent à la surface depuis probablement plusieurs centaines de millions d'années. Comme le rappelle le schéma ci-dessous. De plus il semblerait que les brumes organiques jouent un rôle clé dans de nombreux processus planétaires, allant de l'influence sur le bilan radiatif d'une atmosphère à la source de molécules prébiotiques à la surface. (S. M. Hörst et M. A. Tolbert 2014)

I- POURQUOI LA SIMULATION EXPÉRIMENTALE ?

La composition chimique des aérosols organiques de Titan reste mal caractérisée malgré les nombreux résultats de la mission spatiale Cassini-Huygens. Par exemple, les données recueillies et analysées par les spectromètres infrarouges Cassini/VIMS et Cassini/CIRS ne sont pas suffisamment détaillées sur la composition des aérosols (Hirtzig et al., 2013, Vinatier et al., 2012).

Par ailleurs compte tenu des contraintes du spatial, le nombre d'instruments qu'il est possible d'embarquer sur une sonde reste très limité. Par conséquent pour pallier aux lacunes de mesures in situ, il est nécessaire d'avoir recours à la simulation en laboratoire. C'est dans ce but que plusieurs plateformes expérimentales aboutissant à la synthèse d'analogues d'aérosols de Titan ont été développées dans différents laboratoires internationaux. (Europe, États-Unis, Japon...). Toutes ces expériences sont donc, à ce jour, susceptibles de fournir des informations sur les propriétés physiques et chimiques des aérosols. C'est la raison pour laquelle les analogues de laboratoire des aérosols de Titan, appelés « Tholins », sont étudiés depuis les années 1980 (Par exemple, en 1981 Khare et al ont utilisé du plasma chaud pour un mélange $\{\text{CH}_4+\text{NH}_3+\text{H}_2\text{O}\}$ et en 1984 ils ont utilisé du plasma froid $\{90\%\text{N}_2-10\%\text{CH}_4\}$; L'expérience Titan Haze Simulation sur COSMIC : simulation atmosphère Titan par jet plasma (Farid Salama 2014).

Cependant parmi ces nombreuses expériences ainsi réalisées à travers le monde, quelles sont celles qui permettent d'obtenir les Tholins les plus représentatifs des aérosols de Titan ?

Tout d'abord ce qui différencie tous ces dispositifs expérimentaux réside dans le choix du type d'énergie appliqué au mélange gazeux afin de produire les analogues d'aérosols de Titan. D'après les différents modèles théoriques et simulations numériques, il est montré que plusieurs critères peuvent être pris en compte pour statuer sur leur représentativité :

- Leur structure.
- Leur taille.
- Leur composition chimique.

Par conséquent pour les analogues d'aérosols obtenus par simulation expérimentale, il faudra nécessairement confronter leurs propriétés à celles déterminées par les instruments embarqués sur les sondes Cassini - Huygens.

II- SIMULATION EXPÉRIMENTALE AU MOYEN DU DISPOSITIF PLASMA RADIO-FRÉQUENCE PAMPRE AU LATMOS. (*Approche par expérience*)

Le projet Pampre a été porté par l'équipe du laboratoire « LATMOS » et dirigé en 2010 par madame Nathalie Carrasco. (*Professeure à l'Université de Versailles St-Quentin en Yvelines*)

Tout d'abord, le LATMOS (Laboratoire Atmosphères Milieux et Spatiales) s'inscrit dans des programmes de recherche qui visent à simuler en laboratoire l'atmosphère de Titan. L'idée est de simuler la physico chimie de son atmosphère en utilisant deux sources d'énergie : une décharge électrique (plasma poudreux) et du rayonnement Ultraviolet lointain (VUV) ($\lambda < 150 \text{ nm}$)¹⁷. C'est dans ce cadre d'étude que le LATMOS a conçu un réacteur plasma (PAMPRE) pour produire des poudres organiques (Tholins), des analogues des aérosols de Titan. (*Szopa et al., 2006*)).

1. CONTEXTE :

Certaines plateformes ont développé des sources d'énergie produisant du rayonnement UV pour initier les réactions. (*Bar-Nun et al. 2008*). De plus il est montré que les photons solaires les plus abondants sont celles de longueur d'onde de type Lyman alpha ($121,6 \text{ nm}$) qui est facilement simulé en laboratoire. (*Sagan and Thompson (1984), Yung et al. (1984)*). Or, on a détecté la présence de l'atome N dans les aérosols de Titan. Donc la photolyse Lyman alpha du méthane seul ne permet pas d'expliquer toute la complexité de la formation des Tholins de Titan. En 2007, *Imanaka et Smith* ont montré qu'il était possible d'initier des réactions complexes à partir de la photodissociation de N_2 à l'aide de photons VUV énergétiques. Ces expériences ont mis l'accent sur le rôle majeur que joue la dissociation de N_2 dans la formation des précurseurs pour les aérosols organiques. Cependant ce domaine de longueur d'onde n'est accessible que dans la haute atmosphère de Titan. (*Ionosphère ou haute stratosphère*). De plus il est souvent utile d'ajouter des espèces chimiques supplémentaires telles que HCN et HC_3N afin de simuler la réactivité de l'azote dans le milieu réactionnel.

Alors, quelle autre source d'énergie est disponible en dehors des photons VUV pour favoriser la formation des Tholins ?

Par ailleurs, les observations de Cassini UVIS ont mis en évidence la présence d'azote moléculaire et atomique sur la base de spectres d'émissions dues à la dissociation et à l'excitation des électrons. Ces observations permettent de conjecturer que la magnétosphère¹⁸ de Saturne est sans doute un moyen très efficace pour véhiculer les particules très énergétiques telles que les électrons, les protons provenant du flux solaire vers l'atmosphère de Titan.

De plus, d'après *Krasnopolsky (2009)*, il semblerait que pour les molécules de diazote, c'est majoritairement l'action des électrons de la magnétosphère saturnienne qui interviennent et provoquent leur dissociation en radicaux très réactifs. Ainsi l'impact de ces électrons dans un milieu riche d'azote donnerait naissance à un plasma froid qui pourrait initier les précurseurs

¹⁷ Cette gamme spectrale $10 \text{ nm} < \lambda < 150 \text{ nm}$ est appelée ultraviolet sous vide (10^{-5} à 10^{-6} mbar (10^{-3} à 10^{-4} Pa)

¹⁸ La magnétosphère d'une planète résulte de l'interaction de son champ magnétique avec le vent solaire. Les particules (protons -électrons) accélérées sont guidées par les lignes du champ magnétique. (*Voir figure.9 en annexe « Document 11 »*)

organiques responsables de la formation des brumes organiques de type « Tholins » observés sur Titan. C'est ainsi que d'autres études expérimentales autour des plasmas froids ont pu être développées en laboratoire. Selon *Thompson et al en 1991, Cabane et Chassefière en 1995*, l'impact électronique via l'établissement d'un plasma froid permet de simuler les électrons et les protons provenant de la magnétosphère de Saturne ainsi que le rayonnement cosmique.

Cette source d'énergie provenant des plasmas froids est souvent privilégiée puisqu'elle favorise la production des aérosols à partir de mélanges composés uniquement $\{N_2+CH_4\}$.

On a effectivement constaté que dans les expériences de source d'énergie par décharge plasma, la quantité d'aérosols produits était plus importante qu'avec les dispositifs photochimiques. Cependant dans de nombreuses expériences par décharge plasma la morphologie des aérosols produits n'est pas exactement fidèle à celle attendue dans l'atmosphère de Titan.

Ainsi afin de pouvoir mieux reproduire les Tholins de Titan, un réacteur à plasma froid nommé « PAMPRE » a été conçu au laboratoire Latmos. L'Acronyme « PAMPRE » désigne « *Production d'Aérosols en Microgravité par Plasmas REactifs* ». Il est basé sur une technique de plasma radiofréquence couplé capacitivement.¹⁹ (Voir dans la partie 3.a) (*Nathalie Carrasco 2012*)

2. OBJECTIFS de PAMPRE :

Produire et analyser les analogues des aérosols de Titan afin de comprendre à partir de mélanges $\{N_2+CH_4\}$, comment les particules solides (Tholins) peuvent se former dans l'atmosphère de Titan ?

Tout d'abord avant de décrire l'expérience PAMPRE rappelons ce qu'est un plasma en général et ce qu'est un plasma froid.

➤ QU'EST-CE QU'UN PLASMA ? DANS QUEL CAS OBTIENT-ON UN PLASMA FROID ?

Lorsqu'un milieu gazeux reçoit suffisamment d'énergie pour permettre aux atomes et aux molécules qui y résident de s'ioniser, le milieu contient alors des électrons et des ions ou molécules ioniques. Si de plus, l'ionisation du milieu est telle, qu'il puisse permettre la libération d'une quantité non négligeable d'électrons alors les espèces chargées du milieu peuvent agir collectivement pour former ce qu'on appelle un plasma.

Conclusion 1 :

Ionisation d'un milieu + effet collectif = Plasma. Les plasmas sont des gaz ionisés et électriquement neutre. Ils existent dans une très large gamme de densité et d'énergie. On distingue deux types de plasmas :

- Les plasmas chauds : ce sont des gaz totalement ionisés. Par exemple le cœur des étoiles est un plasma chaud.
- Les plasmas froids : ce sont des gaz partiellement ionisés où les collisions entre particules ont un rôle majeur. Par exemple les aurores boréales sont des plasmas froids.

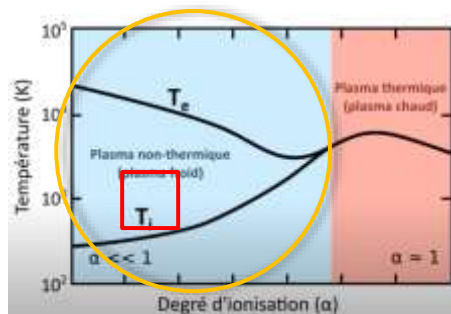
En physique les plasmas sont caractérisés par leur température électronique et leur densité de charge. Cette dernière peut aller de 10^{-2} cm^{-3} à 10^{23} cm^{-3} tandis que la température peut aller de

¹⁹ Une tension radiofréquence est appliquée entre deux électrodes pour produire le plasma. Le champ « E » RF est couplé au plasma par les capacités de gaine. (*Philippe LEFAUCHEUX – GREMI UMR 6606 – Bonascre 2003*)

10^3 à 10^{10} K. Les plasmas étant composés d'ions et d'électrons, les températures de ces deux entités ne sont pas les mêmes. La différence entre ces deux températures dépend majoritairement d'un paramètre appelé « le degré d'ionisation » : $\alpha = n_e / (n_e + n_n)$, où « n_e » : densité d'électrons libres et « n_n » est la densité de particules neutres.

Ce paramètre représente en quelque sorte le taux d'espèces chargées sur le taux d'espèces présentes dans le milieu. Lorsque $0 < \alpha < 1$, le plasma est faiblement ionisé et lorsque $\alpha = 1$, cela correspond à un plasma totalement ionisé dans lequel il n'existe plus d'espèce chimique ou particule neutre. Le profil de la température des ions permet ainsi de caractériser les différents types de plasma.

Dans le cas d'un plasma obtenu par décharge électrique, le profil de température des ions dépend du paramètre d'ionisation. Sur ce profil on y fait figurer également le taux d'ionisation « α ».



Dans ce type de plasma, il existe alors trois types d'espèces : les électrons, les ions et les neutres. Les espèces neutres sont celles qui y sont majoritairement présentes et leur température avoisine celle des ions. Ainsi les températures des espèces ioniques et neutres sont toutes deux extrêmement faibles devant celle des électrons. Un tel plasma est dit « Froid ». (Vidéo Youtube « les secrets du plasma »).

Figure.4- Chap IV-II-2.a Profil de température pour un Plasma par décharge électrique : extrait Microsoft Bing et vidéo Youtube « les secrets du plasma ».

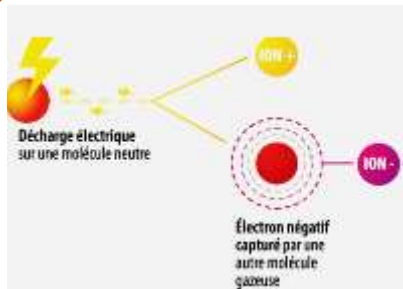


Figure.5 Chap IV-II-2.b Principe : Microsoft Béing Image extraite de France Air.

Conclusion 2 : Le plasma froid est un gaz partiellement ionisé (la fraction de particules chargées dans le gaz est d'environ 1%) avec une température de plusieurs dizaines de degrés ($30-40$ °C). Il existe plusieurs types de décharge pour obtenir un plasma froid.

- Excitation à courant alternatif, à courant continu et excitation basse fréquence.
- Excitation par ondes radios (souvent 13.56 MHz) ou Excitation par micro-ondes appliquées à un mélange gazeux (Coll et al. (1997)). Ces décharges se déroulent couramment à basse pression.

Dans ces plasmas, les électrons sont le moteur des réactions chimiques et permettent alors d'enclencher des processus : D'excitation d'espèces chimiques, d'ionisation d'espèces chimiques neutres, de dissociation des molécules.

L'excitation des espèces chimiques est la cause d'émission radiative induisant leur aspect lumineux et colorés dans les plasmas.



Figure.6 (Chap IV-II-2.c): (Nathalie Carrasco 2012) Exemple Photo d'un plasma $\{N_2-CH_4\}$ dans la cavité réactive de PAMPRE ; la trace verte correspond à la diffusion par les poudres en suspension d'un laser vert

3- Dispositif expérimental de la plateforme Pampre :

3.a. Schéma et photo du dispositif expérimental Pampre : (N. Carrasco 2012 (Latmos))

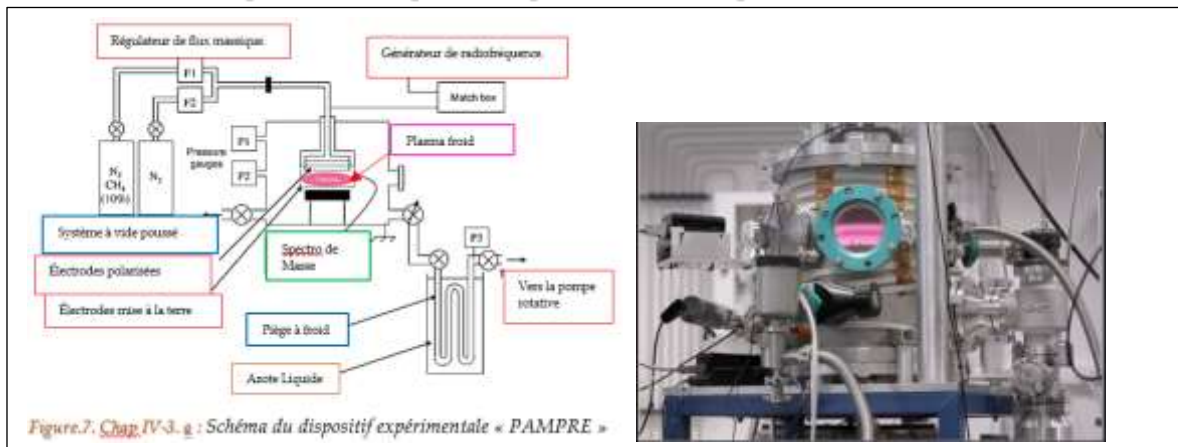
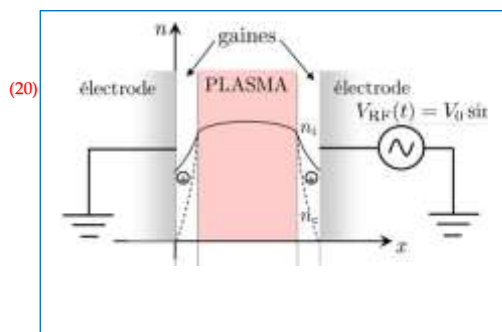


Figure.7. Chap IV-3. a : Schéma du dispositif expérimentale « PAMPRE »

3.b Principe de l'expérience :

Le réacteur est alimenté par les deux bouteilles présentées dans le schéma ci-dessus (l'une d'azote pur à 100 %, l'autre de mélange $\{90\%N_2 + 10\%CH_4\}$), permettent d'ajuster la concentration de méthane (CH_4) du mélange gazeux initial $\{N_2-CH_4\}$ entre 0 et 10%. La décharge radiofréquence dans la cavité plasma est assurée par un générateur de fréquence 13,6 MHz de puissance réglable de 0 à 100W. (Coll et al. (1997) La décharge a lieu entre deux électrodes couplées capacitivement, l'une polarisée (électrode du haut), l'autre est reliée à la Terre (électrode du bas). Cette décharge électrique génère des électrons qui sont accélérés par une différence de potentiel ($\approx 2kV$) entre les deux électrodes (Anode et Cathode).

⇒ Figure.8 Chap IV-II-3.b : Exemple de Schéma de principe d'un réacteur Capacitif :



–Des gaines de charges d'espace se forment devant les électrodes (deux surfaces en influence totale analogue à un condensateur, le plasma joue le rôle du diélectrique) Ici la puissance Radio (RF) est fournie à travers le Match Box (Circuit : Bobine + capacitif = adaptateur de puissance ou d'impédance). La décharge peut fonctionner soit en régime continue ou en mode pulsé (Le plasma est alors allumé pendant 350-450 s et éteint pendant 50 s).

(20) <https://www.researchgate.net/publication/331022380> Experimental demonstration of multifrequency impedance matching for tailored voltage waveform plasmas [2025].

(21) M G Alcouffe (Université de Versailles St Quentin, LATMOS)

Une partie des électrons ainsi générés réagissent avec les molécules présentes dans le réacteur en ionisant certaines molécules qui vont alors produire des électrons susceptibles d'exciter à leur tour d'autres molécules de gaz neutres. Ainsi par réactions en chaîne, un milieu gazeux partiellement ionisé et stable va s'établir entre les deux électrodes et constituer par conséquent un plasma froid Radio Fréquence à basse pression ($\approx 1\text{mbar}$). De plus, afin de se rapprocher des conditions en température de l'atmosphère de Titan et de mieux simuler la chimie qui se déroule à ces températures, un piège à froid plongé dans de l'azote liquide est installé dans le dispositif expérimental pour éviter que les gaz issus de l'expérience ne pénètrent dans la pompe. (Voir Sagan et Khare (1971), Navarro-Gonzalez et Ramirez (1997), Coll et al. (1999))

Dans ce plasma, il se produit de nombreuses collisions entre les électrons et les molécules neutres. On distingue différents types de collisions. Ce sont majoritairement les collisions dites inélastiques dans laquelle l'énergie cinétique n'est pas conservée qui seront à l'origine de la synthèse des Tholins (Nguyen (2007)). En effet une partie de l'énergie des électrons est ainsi transférée aux molécules neutres qui se retrouvent dans un état excité. Une fois dans cet état excité, elles se dissocient ensuite sous forme de radicaux. Ces radicaux sont très réactifs et vont interagir par la suite pour produire des hydrocarbures et le radical cyanure (CN^{\bullet}). Ce radical « CN^{\bullet} » étant très réactif, il réagit aisément avec les hydrocarbures pour conduire à des molécules de plus en plus grosses comme le cyanure d'hydrogène (HCN), le cyanoacétylène (HC_3N), le dicyanoacétylène (C_4N_2), le cyanogène (C_2N_2), etc.. (Coll et al. (1997, 1999)).

Ces molécules précurseurs qui se forment conduisent par polymérisation à des molécules plus grosses (oligomères de structure inconnue) qui se condensent. Ces agrégats continuent de croître pour devenir des grains sphériques de $1,5\ \mu\text{m}$ de diamètre. Par la suite, ces grains sphériques micrométriques évoluent en s'agglomérant et forment des films fins de Tholins de couleur marron orangé qui recouvrent les parois intérieures du réacteur (Voir Fig 3.a et Fig 3.b). (N. Carrasco 2012 (Latmos)). Un exemple de Tholins qui a été obtenu après plusieurs heures d'expériences en plasma continu d'azote-méthane pour différente concentration de CH_4 . La quantité de ces analogues d'aérosols semble dépendre du pourcentage en méthane dans le mélange initial.

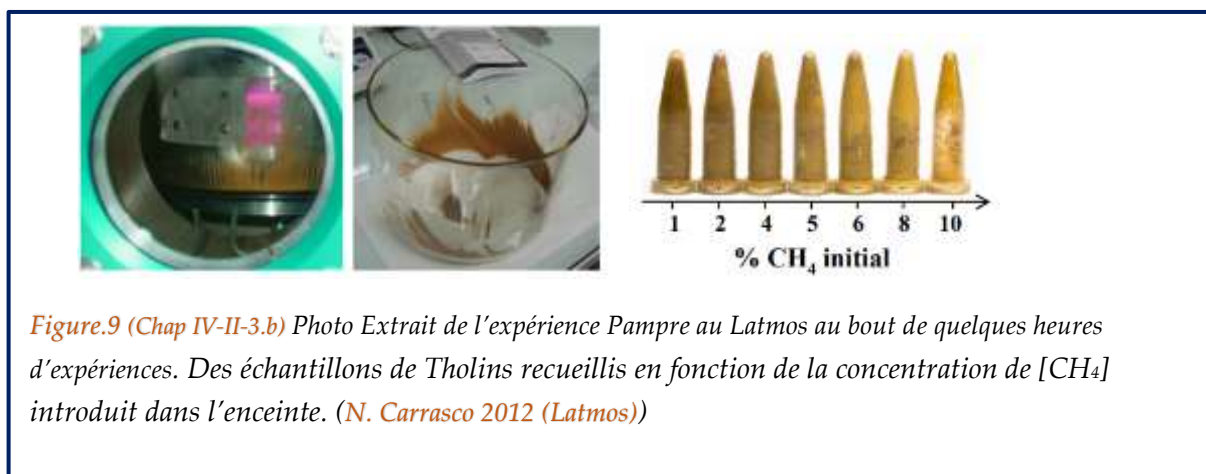
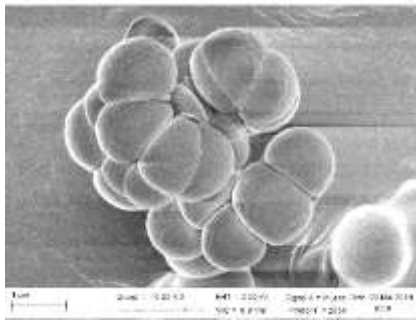
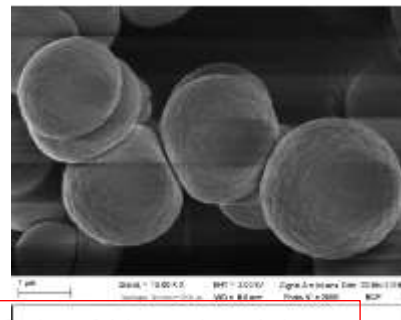


Figure.9 (Chap IV-II-3.b) Photo Extrait de l'expérience Pampre au Latmos au bout de quelques heures d'expériences. Des échantillons de Tholins recueillis en fonction de la concentration de $[\text{CH}_4]$ introduit dans l'enceinte. (N. Carrasco 2012 (Latmos))



Agrégat de monomères primaires



Grains sphériques micrométriques

Figure.10 (Chap IV-3.b): (Z. Perrin¹, N. Carrasco 2021) : Origine atmosphérique d'un polymère dérivé du HCN sur Titan.

III. COMMENT VALIDER LES ANALOGUES « THOLINS » PRODUITS PAR L'EXPÉRIENCE PAMPRE ?

Différentes techniques permettent d'analyser les Tholins synthétisés au cours de l'expérience. Il est possible de procéder à des analyses in-situ sur le montage en réalisant par exemple de la spectroscopie d'émission optique. Cela permet par diffusion optique d'étudier l'évolution de la taille des particules de Tholins solides formés au cours du temps dans le montage. On réalise des analyses ex-situ également comme de la microscopie par balayage électronique (MEB) pour caractériser leur forme et leur taille, de la spectroscopie de masse et IR pour identifier leur composition chimique, et également des mesures de pesées.

On peut ainsi mettre en parallèle les données recueillies lors des différentes missions spatiales sur les brumes organiques de Titan avec les résultats d'analyses des analogues obtenus par Pampre. C'est ainsi que progressivement on a pu mettre en évidence des signatures communes dans les Tholins de Titan et ceux de Pampre. Par exemple Rannou et al., ont identifié en 2010, par l'exploitation des données du spectromètre VIMS de Cassini une bande d'élongation d'absorption IR à 3,4 μm caractéristique d'une signature de fonctions aliphatiques ($-\text{CH}_2/-\text{CH}_3$) dans les aérosols de Titan. Puis ils ont constaté que cette même bande a également été mise en évidence dans le même domaine spectral pour les Tholins de Pampre dans un article publié en 2008 par Quirico et al. De plus, des analyses chimiques par spectrométrie de masse ont été menées par Carrasco et al., 2009 ; Pernot et al., 2010 sur les Tholins de PAMPRE. Tous ces résultats ont montré qu'il y avait beaucoup de points communs entre les spectres de masses des ions lourds mesurés par Cassini dans l'ionosphère de Titan et ceux obtenus pour les Tholins de Pampre. Voici quelques clichés de molécules extraites d'échantillons d'analogues d'aérosols de Titan qui ont été produits au laboratoire et observés par Microscopie à Force Atomique (AFM)

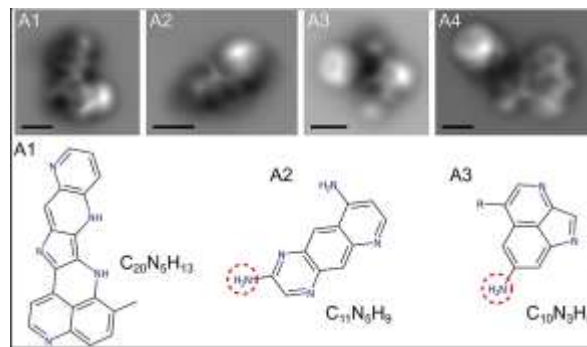


Figure.11 (Chap IV-3.c): Image extraite « The Astrophysical Journal 2021» La barre horizontale donne l'échelle à 0,5 nm. Ces molécules contiennent plusieurs cycles constitués principalement de carbone (C) et un peu d'azote (N).

Cependant, il semblerait que d'une expérience à une autre la taille des monomères varie selon les conditions de l'expérience par exemple selon le type d'énergie utilisé, la pression, la température de synthèse ainsi que selon la composition chimique du mélange gazeux initial. Pour les expériences utilisant les plasmas froids, le diamètre des monomères varie de $0,1\mu\text{m}$ à $1,5\mu\text{m}$, or les modèles prédisent des diamètres de l'ordre de $0,04\mu\text{m}$ selon *Tomasko et al. (2009)*. Par ailleurs lorsqu'on les compare aux expériences réalisées en UV, les diamètres s'étendent de $0,05$ à $0,8\mu\text{m}$ *Cable et al. (2012)*. Il est par conséquent important d'en vérifier plusieurs propriétés pour juger de la validité des analogues d'aérosols synthétisés en laboratoire par rapport aux Tholins observées par Cassini. Très souvent une analyse complémentaire sur les rapports C/H et C/N s'avèrent être intéressants pour comparer les expériences issues de voies de synthèse différentes. Ces rapports permettent d'estimer si les espèces organiques formées sont davantage un puits de carbone ou d'azote sur Titan (*McKay et al. (1996)*). En effet, il est suggéré que plus la pression est basse lors des expériences plus des composés aromatiques polycycliques contenant de l'azote se forment, cela suggère alors une diminution du rapport C/N avec la pression (*Imanaka et al. (2004)*). Cela suppose que des composés aromatiques polycycliques pourraient être présents dans les brumes de Titan et par conséquent elles pourraient facilement absorber dans l'UV grâce à leurs systèmes π conjugués. La détermination des rapports C/H et C/N permet également d'accéder au degré d'insaturation/saturation des Tholins. Ceci est un paramètre essentiel dans la détermination des propriétés optiques mais aussi sur la capacité des Tholins à être hydrolysés et par conséquent à incorporer de l'oxygène (*Cable et al. (2012)*). Par ailleurs les propriétés optiques des aérosols sont essentielles pour quantifier leur capacité absorbante et diffusante du rayonnement solaire. Ce sont ces propriétés optiques qui permettent d'expliquer entre autres la couleur jaune doré de Titan dans les longueurs d'onde du visible.

Conclusions :

Il semblerait qu'à l'heure actuelle, ce sont les Tholins synthétisés avec un plasma froid à partir d'un mélange gazeux initial d'azote moléculaire et de méthane qui seraient les plus

représentatifs des aérosols de Titan (*Coll et al. (2013), Nna-Mvondo et al. (2013)*). Ces expériences à plasma froid présentent l'énorme avantage d'être une source d'énergie efficace, bien que basée sur des électrons, qui soit comparable au spectre énergétique solaire. Une telle source d'énergie est particulièrement intéressante puisqu'elle permet de déposer l'énergie suffisante à la dissociation de l'azote moléculaire. Ceci est fondamentale pour initier les processus chimiques dans l'atmosphère de Titan. De plus, ce dépôt d'énergie est particulièrement efficace pour la production de grande quantité de Tholins, analogues d'aérosols de Titan. Toutefois, les processus d'impacts électroniques qui sont réalisés dans les montages à plasma et bien qu'efficace ne sont pas strictement équivalents aux processus de photo-dissociation. Par ailleurs l'un des inconvénients que peuvent présenter ces réacteurs à plasma, c'est que ses électrons très énergétiques peuvent initier également des réactions chimiques parasites c'est-à-dire non présentes dans la haute atmosphère absorbant principalement les rayonnements VUV du soleil. C'est la raison pour laquelle, un autre réacteur a été développé en complément de Pampre. Il s'agit d'un réacteur photochimique couplée à la lumière synchrotron de Soleil ou d'une source UV semblable. (*Rayonnement Lumière émise par des électrons ultrarelativistes accélérés par trois accélérateurs et de très hautes énergies $\approx 2,76$ GeV*). Il a été nommé « APSIS » pour *Atmospheric Photochemistry Simulated by Synchrotron*. Les expériences sont réalisées dans les conditions aussi proches que Pampre (*P, T, débit, large spectre continu dans l'UV*) mais en utilisant une source d'énergie photonique très comparable au spectre du soleil. Il permet de simuler la réactivité dans des couches atmosphériques plus basses qui sont préservées du rayonnement solaire ionisant de la haute atmosphère. (*Selon N. Carrasco 2012 (Latmos)*).

CONCLUSION GÉNÉRALE :

Ce travail bibliographique sur les « Brumes organiques » de Titan est référencé et inspiré des différents travaux qui ont été menés pour tenter de comprendre la complexité de l'atmosphère de Titan. Il s'appuie également sur les données recueillies lors des différentes missions spatiales notamment Voyager 1&2 et Cassini-Huygens.

Notre objectif était de mettre en avant les différentes démarches scientifiques qui ont permis à ce jour d'avancer sur la chimie très complexe s'effectuant dans l'atmosphère de Titan. Nous avons montré à partir des observations et des mesures réalisées par les différents instruments embarqués sur Cassini, comment il a été possible d'établir des modèles théoriques (*chimiques et physique*), des modèles numériques (*chimiques et physique*) et des montages expérimentaux qui tentent de comprendre les différents processus physicochimiques qui se déroulent dans l'atmosphère de Titan. À travers ce mémoire, nous avons montré à quel point une chimie vaste et variée a pu se développer et comment celle-ci pourrait probablement conduire à la formation des aérosols organiques « Tholins » formant les brumes de Titan. Nous comprenons selon notre étude que ces aérosols ont joué différents rôles dans son atmosphère. Nous nous sommes seulement concentrés sur la composition chimique et quelques propriétés optiques liés aux Tholins. Cependant beaucoup d'autres travaux tentent de comprendre le rôle important des aérosols notamment dans le transfert radiatif (*McKay et al. (1989, 1991)*), dans la dynamique atmosphérique et le climat (*Rannou et al. (2002)*). Ils interviendraient probablement dans différents processus dont leurs implications à ce jour restent encore mal comprises. Cependant

nous comprenons très bien à travers ce travail, que les chercheurs tentent par tous les moyens de caractériser la chaîne complète des processus chimiques atmosphériques de Titan, depuis la dissociation des composés primaires en phase gazeuse, jusqu'à la formation des brumes organiques en suspension dans son atmosphère. Pour cela de nombreux outils de modélisation et de simulation expérimentales ont été développés. Ils pensent que les processus physicochimiques conduisant à la formation d'aérosols organiques dans des atmosphères planétaires extra-terrestre ne sont pas limités uniquement à Titan. (N.Carrasco 2012) Comme nous l'avons montré, Titan fait l'objet d'études intensives aujourd'hui car il représente probablement l'analogue glacé de la Terre primitive, en ce sens il constitue un système d'intérêt exobiologique pour les chercheurs. Carl Sagan et son équipe ont montré en 1986 que les Tholins combinées à de l'eau pouvaient former des acides aminés, des nucléotides qui sont des composantes essentielles à la vie. On s'accorde aujourd'hui à affirmer que la chimie organique abiotique de l'atmosphère de Titan est la plus efficace connue dans le système solaire malgré les conditions de températures et de pression peu propice à la vie (Atreya, 2006) Par ailleurs, cette théorie gagne en crédibilité depuis la détection, en 2014 sur Titan, des molécules C_2H_3CN et C_2H_3CNH qui pourraient former des membranes cellulaires analogues aux organismes terrestres. Depuis les découvertes des exoplanètes, de nouvelles perspectives s'ouvrent aux chercheurs, comment caractériser les exoplanètes et leurs atmosphères ? Ainsi les études menées sur la chimie des molécules organiques de Titan pourraient probablement s'étendre à des planètes en dehors de notre système solaire et à d'autres atmosphères comparables. En effet en 2008, Swain et al ont rapporté la première détection de méthane dans une atmosphère d'exoplanète.

Remerciements :

Ce travail de recherche bibliographique et de réflexion que j'ai réalisé n'aurait pas pu se faire sans le DU ECU d'une part et sans le DU SU d'autre part. Je tiens donc à remercier dans un premier temps les responsables de ces formations qui m'ont permis de vivre cette aventure très enrichissante à travers le DU ECU puis me donner par la suite l'opportunité de la poursuivre à travers le DU SU. Je remercie tout particulièrement M. Tanguy Bertrand qui a proposé ce sujet sur la formation des brumes organiques de Titan. Effectivement, cette lune de Saturne m'était totalement inconnue, les missions « Voyager 1 & 2 », ainsi que celle de Cassini-Huygens ne m'étaient pas très familières non plus. Ainsi grâce à M. Tanguy ainsi qu'à M. Pierre Cristofari, j'ai pu découvrir Titan et surtout enrichir mes connaissances scientifiques à travers les différents articles de recherches traitant des observations et des simulations divers et variées. Je tiens donc à vous adresser mes plus sincères remerciements pour le suivi, l'organisation rythmée et les échanges réguliers qui ont été programmés entre étudiants du DU SU. Cela nous a permis de développer des compétences d'analyses et de réflexions assez poussées en astrophysique.

Références Bibliographie :

- [1] Alcouffe M.G « Plasma à couplage capacitif utilisé pour simuler la chimie atmosphérique de Titan » (2009) Université de Versailles St Quentin, LATMOS.
- [2] ACS Earth Space Chem 2024 : Publication : « la composition et la chimie de l'atmosphère de Titan »
- [3] Alice Le Gall « LES MONDES de Saturne » édition Belin octobre 2022.
- [4] Bar-Nun, A., Kleinfeld, I., Ganor, E., 1988. *Shape and optical properties of aerosols formed by photolysis of acetylene, ethylene, and hydrogen cyanide. Journal of Geophysical.*
- [5] Bellucci, A., Thèse 2008. *Analyse d'occultations solaires et stellaires par Titan observées par l'instrument Cassini/VIMS. Université Paris VI - Pierre et Marie Curie.*
- [6] Cabane, M., Chassefière, E., 1995. *Laboratory simulations of Titan's atmosphere: organic gases and aerosols. Planetary and Space Science.*
- [7] Carrasco, N., Schmitz-Afonso, I., Bonnet, J.Y., Quirico, E., Thissen, R., Dutuit, O., Bagag, A. (2009). *Chemical Characterization of Titan's Tholins: Solubility, Morphology and Molecular Structure Revisited. Journal of Physical Chemistry.*
- [8] Clarke, D.W., Ferris, J.P., 1997. *Titan haze: Structure and properties of cyanoacetylene and cyanoacetylene-acetylene photopolymers.*
- [9] *Détection du propène dans la stratosphère de Titan – Iop science.*
- [10] David Dubois et al, Nathalie Carrasco Thomas Gautier (Icarus 338 (2020) <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.113437>
- [11] E. Constantin. P. Traldi.. *Spectrométrie de Masse : Principes et Applications. Technique et Documentation Lavoisier. 2ème édition, 1996.*
- [12] Li Zhou, Weijun Zheng. al (2009) : *Formation de benzène à la surface de la lune de Saturne, Titan, grâce aux rayons cosmiques.*
- [13] Li, J. ; Yu, X. ; Sciamma-O'Brien, E. ; Il, C. ; Seebree, J. A. ; Salama, F. ; Hörst, S. M. ; Zhang, X. *Une étude comparative inter-laboratoires des analogues de Titan Haze : énergie de surface. (2022, 3, 2, DOI: 10.3847/PSJ/ac3d27).*
- [14] Michel Nuevo et al : *L'expérience Titan Haze Simulation (THS) sur COSmIC. Partie III. Étude XANES d'analogues de laboratoire de tholins de Titan. (Icare Volume 338, 1er mars 2020)*
- [15] Maureen Y. Palmer .al : *Détection ALMA et potentiel astrobiologique du cyanure de vinyle sur Titan. (Sciences advances : 28 juil. 2017 Vol 3, Numéro 7, DOI : 10.1126/sciadv.1700022).*
- [16] NASA Science Cassini-Huygens .
- [17] Nombre de Knudsen — Wikipédia
- [18] Pascal Chabert, Jean-Luc Raimbault, « *Les plasma froids Radiofréquence* » *Laboratoire de Physique des Plasmas, UMR 7648, CNRS/Ecole Polytechnique/Univ. Paris-Sud/UPMC, Palaiseau*
- [19] Rannou, P., McKay, C. P., & Lorenz, R. D. (2003). « *A model of Titan's haze of fractal aerosols constrained by multiple observations* ». *Planetary and Space Science.*
- [20] Sarah Tigrine, Nathalie Carrasco et al. *Photoionisation Fuv des aérosols atmosphériques de titan. (2016)*
- [21] Salama Farid, Ella Sciamma-O'Brien: *Nasa research center (doi.org/10.1016/J.ICARUS.2014.08.004)*
- [22] Tanguy Bertrand, François Forget et Emmanuel Lellouch (2024). « *Comment l'obliquité a façonné différemment les paysages et les climats de Pluton et de Triton. (https://doi.org/10.1073/pnas.2408226121)*
- [23] Tomasko, M. G., Doose, L., Engel, S., Dafoe, L. E., West, R., Lemmon, M., . . . See, C. (2008). « *A model of Titan's aerosols based on measurements made inside the atmosphere* ». *Planetary and Space Science.*

- [24] Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est Coralie Brasse. *Les aérosols organiques de Titan : leurs propriétés physico-chimiques et leurs possibles évolutions chimiques à la surface. Sciences de la Terre*, (2014).
- [25] Thèse de doctorat de l'Université Paris Saclay : Sarah Tigrine. *Simulations de laboratoire de la photodynamique VUV de l'atmosphère de Titan. Astrophysique [astro-ph].(COMUE)*, (2017).
- [26] Thèse doctorale Bruno de BATZ de l'Université de Reims Champagne-Ardenne. *Les cycles de Titan avec un Modèle de Climat Global. Des observations de Cassini à l'exploration de Dragonfly*, (2024).
- [27] V. Vuitton and R. V. Yelle : Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona, (2006) (The astrophysical Journal)
- [28] Xinting Yu Sarah, M. Hörst et Xi Zhang : Énergie de surface de l'aérosol Titan analogue « Tholin » (Publié le 16 décembre 2020) DOI 10.3847/1538-4357/abc55d.
- [29] Yuk L. Yung and Mark Allen et Joseph Pinto Center for Earth and Planetary Physics, Harvard University 1984. (The astrophysical Journal)

ANNEXE :

Document 1 : Introduction : Le tableau récapitulatif de ces corps azotés. (Triton, Pluton, Titan et la Terre).

Tableau comparatif des données physiques de Titan, de la Terre et de Pluton				
Nom	Titan	Terre	Pluton	Triton
Distance au Soleil en km (UA)	1221850000 km (8,18 UA)	149 597 857 km (1 U.A)	5 900 898 440,5 km (39 UA)	354 800 km de Neptune
Révolution sidérale	> 15,95 jours autour de Saturne	365,242 jours	90 487,27 jours	5,88 jours autour de Neptune
Période de rotation (synchrone)	15,95 jours	23h 59'04"	-6,87 jours (rétrograde)	-5,877
Vitesse orbitale moyenne	5,6 km.s ⁻¹	29,79 km.s ⁻¹	4,74 km.s ⁻¹	
Inclinaison orbitale	0,33 °	23°26'	17,089 °	156,80 par rapport au plan de Neptune
Excentricité orbitale	0,029 192	0,017	0,25	0,000 016
Diamètre	5151 km	12 742 km	Rayon équatorial =1 185 km	2706 km
Magnitude visuelle	8,28	-3,86	-0,8	13,54
Energie reçue du soleil	14,83 W.m ⁻²	240 W.m ⁻²		
Masse	1,34.10 ²³ kg	5,97.10 ²⁴ kg	1,314 .10 ²² kg	2,140 × 10 ²² kg
Gravité	1,352 m.s ⁻²	9,81 m.s ⁻²	0,325 m.s ⁻²	0,78 m/s ²
Vitesse de libération	2,65 km/s	11,2 km/s	1,22 km/s	1,5 km/s
Masse volumique	1,881.10 ³ kg.m ⁻³	5,5210 ³ kg.m ⁻³	1 854 kg.m ⁻³	2,066 kg.m ⁻³ .
Température en surface (équateur)	- 178 °C	+ 15 °C	de l'ordre de 48 K	-235 °C = 38 K.
Composition globale de l'atmosphère	(98,14% N ₂) ,Ar, (1,6% CH ₄)	(78,13%N ₂), (20,9% O ₂), (0,93% Ar) ,(0,04%CO ₂)	90% N ₂ et 10% CO	N ₂ ,CO ₂ ,H ₂ O et CH ₄ et CO gelés
Pression atmosphérique au sol	146,7 kPa	1,013.10 ⁵ Pa	0,65 à 2,4 Pa	14μbar = 10 ⁻¹ pa

Sources : wikipedia.org/wiki (Terre-Titan-pluton-Triton) et [Titan et la mission Cassini-Huygens \(astrosurf.com\)](#)

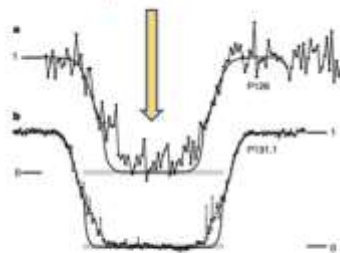
Document 2 : Chapitre I : Courbes de lumière lors d'occultation d'étoiles par Pluton

Pour (P126), le phénomène a été observé grâce à des télescopes fixes et portables situés en Amérique du sud (Argentine, Brésil, Chili, Équateur, Pérou, Venezuela).

En ce qui concerne (P131.1), l'occultation a été étudiée grâce au télescope France-Canada-Hawaï (TCFH) basé à Hawaï.

Voici un exemple de courbes de lumière obtenues par le télescope de Chili muni d'une caméra CCD à large bande dont la sensibilité maximale est proche de $0,6 \mu\text{m}$ et celle du TCFH à Hawaï avec un filtre à bande étroite à $0,83 \mu\text{m}$ ayant un rapport signal/bruit élevé.

Chute drastique de luminosité lors de l'occultation des étoiles P126 et P131.1 par Pluton.



Courbe de lumière observée pour l'occultation de P126 (20 juillet 2002)

Courbe de lumière observée pour l'occultation de P131.1 (21 août 2002)

Figure.1 Chap I-2 (Source) : Nature extrait de l'article B. Sicardie publié en juillet 2003.

Document 3 : Chapitre I : Cycle du méthane : (extrait de Sciences de la Matière et Technologie)

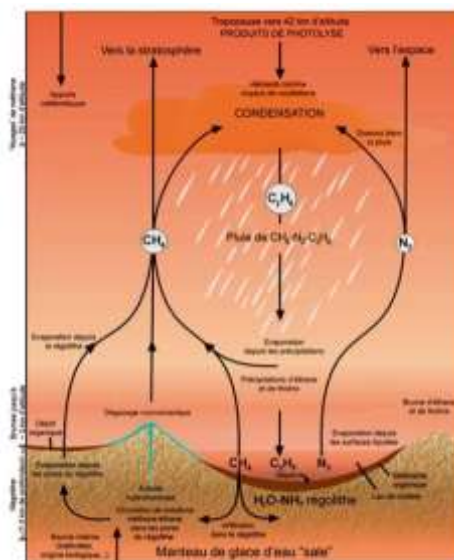


Figure.2 : Le cycle du méthane sur Titan (Crédit : Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques / Université Paris 12).

Document 4 : Chapitre II : Photo d'une occultation par ondes radios (extrait de l'ouvrage « les mondes de saturnes »)

Quelques exemples d'observations basées sur l'occultation¹ :

- Un **spectromètre** ultraviolet embarqué à bord de la sonde spatiale observe le Soleil lorsqu'il disparaît derrière la planète. À cet instant l'atmosphère de la planète s'interpose entre le Soleil et la sonde spatiale ce qui permet d'obtenir un spectre de l'atmosphère qui contribue à déterminer sa structure (épaisseur, densité, etc.) ainsi que sa composition.
- L'occultation d'une étoile suffisamment brillante peut être également utilisée.
- L'émetteur radio émet vers la Terre alors que la planète observée se situe presque entre celle-ci et l'engin spatial. La mesure de l'effet Doppler dû à l'infléchissement des ondes radio permet de déterminer la masse de la planète.
- Le signal radio peut être également utilisé pour déterminer la structure et la composition de l'atmosphère de la planète. Cette technique peut être également utilisée pour étudier la structure et la composition des anneaux des géantes gazeuses pour déterminer leur structure et leur composition lorsque les anneaux s'interposent entre la Terre et la sonde spatiale.



Figure.3 Chap II: « Extrait de l'ouvrage les Mondes de Saturnes : Alice Le Gall (2022)»

Document 5 : Chapitre II : Suite Instrument au bord de Cassini.

- ⇒ Les images ISS (*Imaging Science Subsystem*) ont permis de voir la couche détachée d'aérosols, la stratification de l'atmosphère et la structure particulière du pôle nord (pôle hiver) (*Porco et al. 2005*)
- ⇒ L'instrument IRIS (*Spectromètre Interférométrique Infrarouge*) a détecté HCN, HC₃N, et C₂N₂ dans la basse atmosphère (*Kunde et al., 1981*).
- ⇒ L'instrument UVS (*Spectromètre à Ultra- Violet*) embarqué sur Voyager 1 a détecté N⁺ et N, et a indiqué que N₂ est le principal constituant de la haute atmosphère (*Broadfoot et al., 1981 ; Smith et al., 1982*).
- ⇒ L'instrument CAPS était un spectromètre de masse dit « à temps de vol » car il mesurait le temps de parcours des ions accélérés par un champ électrique. Ainsi un ion léger est plus fortement accéléré par rapport à un ion lourd et atteint donc le détecteur plus rapidement.

Document 6 : Principe d'analyseur de spectromètre de masse :

Par spectrométrie de masse, on peut réaliser des analyses qualitatives et quantitatives.

Des limites de détection inférieures au nanogramme et même au picogramme (10⁻¹² g) sont souvent atteintes. Parmi les différentes techniques d'analyses, on distingue l'analyseur quadripolaire et l'analyseur à temps de vol qui étaient présent à bords des instruments sur Titan.

- L'analyseur quadripolaire :

Les analyseurs quadripolaires sont constitués de quatre barres parallèles, disposées symétriquement autour d'un axe. Ces quatre barres sont associées électriquement deux par deux. À une paire d'électrodes est appliquée un potentiel électrique de la forme :

$F(t) = [U + V \cdot \cos(\omega \cdot t)]$ sur une électrode et $F = -[U + V \cdot \cos(\omega \cdot t)]$ sur l'autre électrode où: U est

l'amplitude de la tension continue, V est l'amplitude de la tension haute fréquence, ω est la pulsation (fréquence de l'ordre de 2 MHz). Le mouvement des ions est décrit par des équations dites de Mathieu

dont la résolution montre que seuls les ions ayant une valeur du rapport m/z comprise dans une certaine bande possèdent une trajectoire stable et sont transmis par le filtre, les autres ions étant captés par les électrodes. Ce rapport m/z dépend de la distance séparant les électrodes, de la fréquence et des tensions u et v .

- L'analyseur à temps de vol :

À l'intérieur du tube, les ions se déplacent selon un mouvement rectiligne uniforme. Les ions arrivent donc au collecteur dans l'ordre croissant de leur masse. Supposons que la différence de potentiel d'accélération soit V et que l'énergie acquise soit E .

Un ion de masse m et de charge totale $q = z.e$ aura une énergie cinétique à la sortie de la source :

$E_c = \frac{1}{2} mv^2 = q.V$ d'où $v = (2.q.V / m)^{1/2} = L / T$. Où « L » est la longueur du tube de vol de l'analyseur à temps de vol et T est le temps écoulé pour atteindre le détecteur. D'où : $T = (m / q)^{1/2} L (2.V)^{-1/2}$. Ce type d'analyseur est utilisé pour accéder aux très hautes masses.

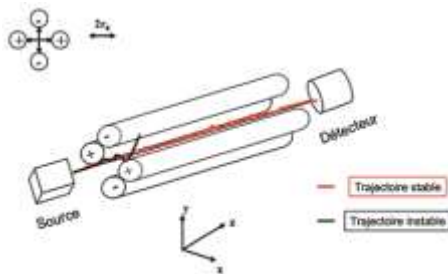


Schéma simplifié des paires d'électrodes dans un spectromètre de masse à quadrupôle : (extrait de Science Direct de l'article Marie-Claude Meneta)

Document 7 : Profil de température mesuré in-situ par HASI (fig.a) et les autres profils (fig.b)

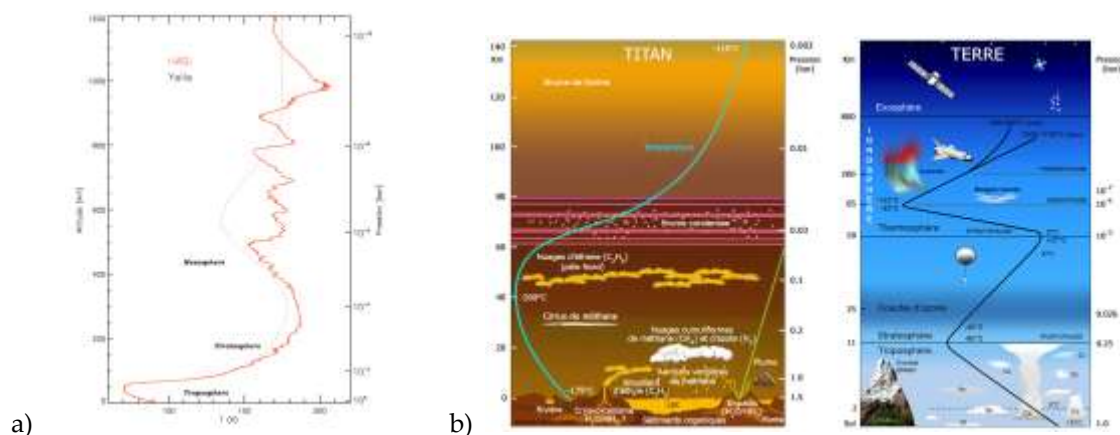



Figure.4 (Chap II) III.1 :

Profil de température mesuré in-situ par HASI (fig.a) et profils comparés de la Terre et Titan (fig.b) (source The European Space Agency ESA) : Fig.a (rouge) et modèle de Yelle (1991) (tirets pointillés noirs) (Fulchignoni et al. 2005,

Document 8 : Tableau donnant une idée des différents composés chimiques détectés dans l'atmosphère de Titan à ce jour.

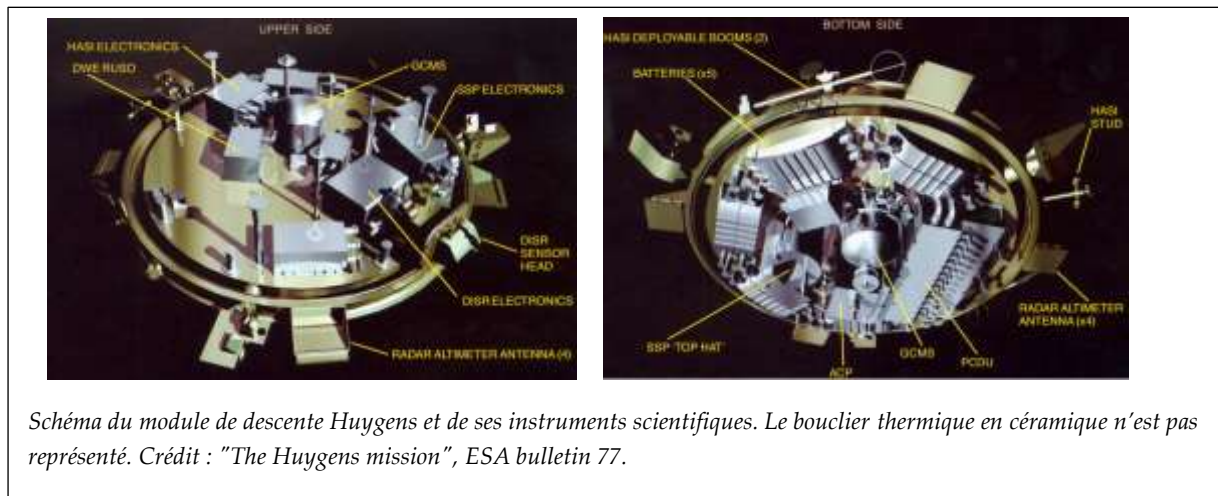
Gaz		Fraction molaire		Références
COMPOSANTS MAJEURS		<i>STRATOSPHERE</i>	<i>SURFACE</i>	=
Azote	N ₂	0,97	=	
Méthane	CH ₄	1,4-1,8×10 ⁻²	4,9×10 ⁻²	1,2,3
Méthane monodeutééré	CH ₄ D	7,5×10 ⁻⁶	=	4
Hydrogène moléculaire	H ₂	1,1 ×10 ⁻³	=	5
Argon	³⁶ Ar	2,8×10 ⁻⁷	=	2
	et ⁴⁰ Ar	4,32×10 ⁻⁵		2
LES HYDROCARBURES		<i>Équateur</i>	<i>Pôle Nord</i>	<i>Références</i>
Éthane	C ₂ H ₆	1,3×10 ⁻⁵	1,7×10 ⁻⁵	4
Acétylène	C ₂ H ₂	3,7×10 ⁻⁶	4,0×10 ⁻⁶	4
	(H-C≡C-H)			
Acétylène monodeutééré	C ₂ HD	2,0×10 ⁻⁹	=	4
	(H-C≡C-D)			
Propane	C ₃ H ₈	6,0×10 ⁻⁷	8,0×10 ⁻⁷	4
	(H ₃ C-CH ₂ -CH ₃)			
Éthylène	C ₂ H ₄	1,6×10 ⁻⁷	1,1×10 ⁻⁷	4
	(H-C=C-H)			
Méthylacétylène	C ₃ H ₄	6,4×10 ⁻⁹	1,2×10 ⁻⁸	4
	(H ₃ C-C≡C-H)			
Diacétylène	C ₄ H ₂	1,3×10 ⁻⁹	4,2×10 ⁻⁹	4
	(H-C≡C-C≡C-H)			
Vinyle acétylène	C ₄ H ₄			
	HC≡C-CH=CH ₂			
Benzène	C ₆ H ₆	3,0×10 ⁻¹⁰	1,1×10 ⁻⁹	4
				

Gaz	Fraction molaire		Références
<i>Les Nitriles</i>	<i>Équateur</i>	<i>Pôle Nord</i>	<i>Références</i>

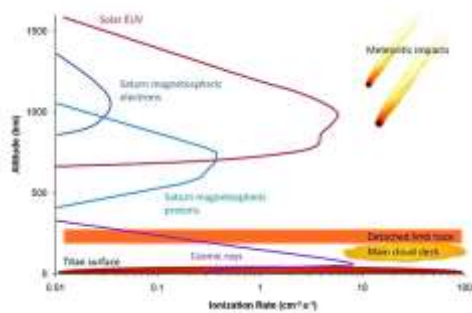
<u>Cyanure d'Hydrogène</u>	<u>H-C≡N</u>	<u>1,3×10⁻⁷</u>	<u>5,5×10⁻⁷</u>	<u>4,6</u>
<u>Cyanoacétylène : HC₃N</u>	<u>H-C≡C-C≡N</u>	<u>3,0×10⁻¹⁰</u>	<u>2,2×10⁻⁹</u>	<u>4</u>
<u>Cyanogène : (C₂N₂)</u>	<u>N≡C-C≡N</u>	<u>5,0×10⁻¹⁰</u>	<u>9×10⁻¹⁰</u>	<u>6</u>
<u>Acétonitrile : (CH₃CN)</u>	<u>H₃C-C≡N</u>	<u>1,5×10⁻⁹</u>	=	<u>8</u>
<u>Les molécules oxygénés</u>		<u>Équateur</u>	<u>Pôle Nord</u>	<u>Références</u>
<u>Vapeur d'eau</u>	<u>H₂O</u>	<u>8,0×10⁻⁹</u>	=	<u>9</u>
<u>Monoxyde de carbone</u>	<u>CO</u>	<u>2-6×10⁻⁵</u>	=	<u>Cf paragraphe 2.2.4</u>
<u>Dioxyde de carbone</u>	<u>CO₂</u>	<u>1,5×10⁻⁸</u>	<u>1,9×10⁻⁸</u>	<u>4</u>

<u>Références :</u>			
<u>1. Flasar et al. (2005)</u>	<u>4. Coustenis et al. (2007)</u>	<u>6. Teanby et al. (2006)</u>	<u>8. Bézard et al. (1993)</u>
<u>2. Niemann et al. (2005)</u>	<u>5. Samuelson et al. (1997b)</u>	<u>7. Samuelson et al. (1997a)</u>	<u>9. Coustenis et al. (1998)</u>
<u>3. Tomasko et al. (2005)</u>	<u>6. Teanby et al. (2006)</u>		

Document 9 : Figure.5 (Chap IV).I



Document 10 : Figure.6 (Chap III) I. 1.a Bilan des sources énergétiques impliquées dans la chimie atmosphérique de Titan.



Crédit : Cable et al. (2012).

Document 11 : Figure.7 (ChapIII) I-2c. Représentation simplifié de la photochimie de l'atmosphère de Titan et

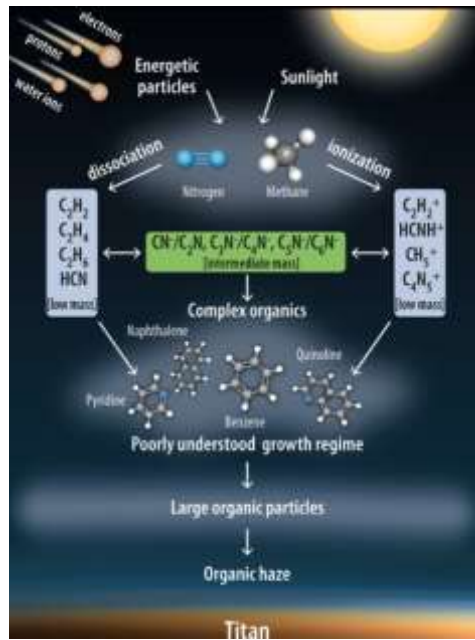


Image adaptée de l'ESA graphique.

Document 12 : Figure.8 (Chap III) II-1.d : Représentation molécules(C₆H₆) et (C₄H₄) et Figure.8 Chap IV. (2.a) partie 2 : Magnétosphère de Saturne)

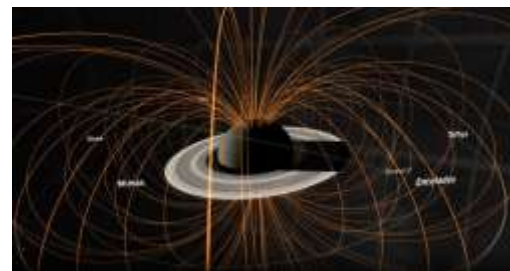


Figure.9. Chap IV.(2.a) La magnétosphère de Saturne lors du survol de Voyager 2.

Figure.8 (Chap III) II-1.d : représentation molécules (C₆H₆) et (C₄H₄)

(Extrait de NASA's Scientific Visualization Studio 27/07/2018).