

Astrochimie : un voyage du milieu interstellaire à la Terre prébiotique

Michaël De Becker

Département d'Astrophysique, Géophysique et Océanographie
Faculté des Sciences
Université de Liège

1. L'astrochimie en quelques mots

La chimie est une discipline scientifique dont le domaine d'application concerne les molécules, et en particulier leurs transformations et leurs mécanismes de formation en fonction des conditions physiques du milieu réactionnel considéré. Dans le mot « astrochimie », le préfixe astro préfigure le contexte physique dans lequel cette chimie est abordée; à savoir les environnements astronomiques, ceux-là même qui sont étudiés par les astrophysiciens.

Il est dès lors opportun de se poser la question suivante : les conditions qui règnent dans l'espace sont elles propices à la formation et à la stabilité des molécules? Si on se réfère au point de vue énoncé par Arthur Eddington dans les années 1920, il est manifeste que la réponse collectivement admise à l'époque était « A priori, non! ». On doit en effet au célèbre astrophysicien britannique la citation suivante : « *Il est difficile d'admettre l'existence de molécules dans l'espace interstellaire, parce qu'une fois qu'une molécule est dissociée il semble n'y avoir aucune chance pour que les atomes se rejoignent à nouveau.* (Arthur Stanley Eddington - 1926) ». Ce point de vue, exprimé en une seule phrase, reprend de manière fort synthétique l'énoncé de deux principes fondamentaux qui n'ont en aucun cas été remis en question près d'un siècle plus tard. Premièrement, les environnements astronomiques sont connus pour être traversés par du rayonnement (ultraviolet, et parfois de plus haute énergie), capable de dissocier aisément des molécules. On conçoit donc difficilement que des molécules jouissent d'une longévité significative dans l'espace. Deuxièmement, pour que les fragments résultant d'une telle dissociation interagissent à nouveau pour se recombinaison, et former ainsi une nouvelle molécule, encore faudrait-il que la probabilité d'une telle interaction soit significative. Or, dans des milieux aussi raréfiés que les environnements interstellaires, les probabilités de rencontre sont très faibles. Pour donner une idée, l'atmosphère terrestre au niveau de la mer, dans les conditions dites normales de température et de pression, est caractérisée par une densité de l'ordre de $2.5 \cdot 10^{19}$ particules par centimètre cube. Dans les nuages interstellaires les plus denses, généralement appelés nuages moléculaires, la densité dépasse rarement 10^6 particules par centimètre cube ! Treize ordres de grandeurs séparent donc notre atmosphère des nuages moléculaires, pour ce qui est de la densité. L'idée que l'existence de molécules soit inhibée dans le milieu interstellaire n'était donc pas absurde, et encore aujourd'hui ces arguments restent valables. Toutefois, même si ces arguments renferment une certaine vérité, ils ne véhiculent pas toute la vérité.

D'abord, il faut tenir compte du fait que même si chaque centimètre cube contient peu de molécules, les volumes de ces nuages interstellaires sont immenses! Les dimensions typiques de tels nuages sont de plusieurs milliers de milliards de kilomètres, et les quantités de matière impliquées sont par conséquent très élevées. Ensuite, la probabilité d'interaction entre partenaires réactionnels a beau être faible, les échelles de temps astronomiques permettent tout de même à un nombre

significatif de réactions de se produire. En plusieurs millions d'années, des réactions chimiques même peu probables disposent d'un délai suffisant pour avoir lieu. Enfin, les conditions de formation de molécules dans le milieu interstellaire ne se limitent pas à la phase gazeuse : des mécanismes complémentaires faisant intervenir de la *poussière interstellaire* s'avèrent très efficaces, et même indispensables pour expliquer les abondances en certaines molécules telles que H_2 , pour ne citer que la plus abondante de toutes !

C'est ainsi qu'à l'heure actuelle, plus de 170 molécules différentes ont été formellement identifiées dans divers nuages interstellaires ! La toute première de cette longue série est la molécule CH, identifiée par Swings & Rosenfeld dans le courant des années 1930¹. Cette abondance et cette diversité de molécules ont conduit les scientifiques à se poser de multiples questions qui pourraient se résumer de la manière suivante :

- Quels sont les mécanismes efficaces de formation de molécules dans les environnements interstellaires ?
- Quels sont les conditions physiques susceptibles d'influencer leur formation et leur transformation ?
- Quel est le degré de complexité moléculaire qui peut être atteint par les espèces chimiques dans l'espace ?
- La chimie interstellaire a-t-elle influencé les conditions initiales d'apparition de la vie sur Terre il y a près de 4 milliards d'années ?

Ces questions constituent les préoccupations centrales de l'astrochimie !

L'astrochimie résulte d'une convergence entre l'astrophysique et la chimie. Cette discipline doit donc relever plusieurs défis, parmi lesquels celui de la démarche pluridisciplinaire. Il n'est en effet pas aisé d'aborder des questions scientifiques vastes au point de défier le cloisonnement arbitraire imposé aux disciplines scientifiques modernes. Dans le cas particulier de l'astrochimie, des principes relevant à la fois de la chimie et de l'astrophysique doivent être réconciliés, et les scientifiques qui s'y attèlent doivent dès lors fournir l'effort requis pour s'adapter aux langages et paradigmes respectifs de ces deux disciplines mères.

Parmi les difficultés inhérentes au contexte particulier de l'astrochimie, on pourrait citer également l'inaccessibilité du « laboratoire ». Les environnements astronomiques dont il est question ici sont pour la plupart totalement inaccessibles, et ne peuvent être observés qu'à distance au moyen d'observatoires au sol ou spatiaux. De plus, les conditions particulières de ces environnements écartent quelque peu l'astrochimie des approches chimiques plus classiques telles que quotidiennement

¹ Rappelons que Pol Swings était astrophysicien à l'Université de Liège. On lui doit de multiples travaux majeurs notamment en spectroscopie appliquée à l'astrophysique, tant stellaire que cométaire. Il a présidé l'Union Astronomique Internationale, et a assumé les fonctions de doyen de la Faculté des Sciences de l'Université de Liège.

appliquées en laboratoire. Citons notamment, la température très basse (de l'ordre de quelques dizaines de Kelvin tout au plus dans les nuages moléculaires), la densité très faible, l'importance du rayonnement ultraviolet émis principalement par les étoiles les plus massives, ou encore l'omniprésence de particules chargées de très haute énergie (appelées « rayons cosmiques ») accélérées dans certains environnements astronomiques.

L'astrochimie pourrait donc se définir comme une discipline scientifique étudiant les mécanismes physico-chimiques de formation et de transformation de molécules dans les environnements astronomiques tels que les nuages interstellaires, les environnements circumstellaires, les comètes, les astéroïdes et le milieu interplanétaire.

2. Les grandes questions scientifiques abordées par l'astrochimie

Sans entrer dans les détails dans le cadre de ce bref exposé, on pourrait arbitrairement identifier des questions scientifiques particulières, au centre des préoccupations de l'astrochimie.

D'une part, on pourrait mentionner la question scientifique qui est à la base même de la définition du domaine, à savoir celle des *mécanismes de formation* de molécules actifs dans les environnements astronomiques, en tenant compte de leurs conditions physiques particulières.

D'autre part, la question de la *complexité moléculaire* est aussi de première importance. Il est évident que des molécules telles que celles qui participent à notre biochimie présentent des propriétés plus élaborées que de simples molécules diatomiques telles que l'hydrogène moléculaire, ou le monoxyde de carbone. Pour aborder la question de la complexité moléculaire, on pourrait parler de deux approches différentes, mais qui se veulent convergentes. D'un côté, on peut envisager de gravir les échelons de la complexité, en partant des molécules les plus simples vers les plus élaborées. Et d'un autre côté, on peut partir des molécules les plus complexes, et ensuite envisager quels devraient être les précurseurs de ces molécules, et progresser ainsi de suite vers les espèces les plus fondamentales. Ces deux approches se veulent convergentes dans le sens qu'elles constituent deux démarches, certes distinctes, mais qui évaluent la même filiation entre espèces chimiques différentes.

Pour terminer, citons la question de la *filiation moléculaire* au travers de l'évolution des environnements astrophysiques. Il s'agit du thème développé dans la section suivante.

3. La filiation moléculaire au travers de l'évolution des environnements astrophysiques

L'exploration des environnements astrophysiques démarre au stade d'un nuage moléculaire. Il s'agit de nuages interstellaires constitués de molécules, mais aussi de quelques atomes. Certaines de ces espèces chimiques sont ionisées : ce type de nuage contient dès lors des ions et aussi des électrons. Enfin, un constituant important de ces nuages est la poussière interstellaire. Ces poussières sont généralement constituées de composés carbonés, ou de silicates, voire même des deux. Outre l'importance de ces poussières dans leur capacité à absorber ou diffuser le rayonnement interstellaire, les poussières jouent un rôle capital dans la chimie interstellaire!

Parmi les nuages interstellaires, les nuages moléculaires sont ceux qui présentent la plus haute densité : de 10000 à 1 million de particules par centimètre cube (c'est à dire, 13 à 15 ordres de grandeur plus faible que l'atmosphère terrestre au niveau de la mer). Typiquement, cette phase 'calme' du nuage moléculaire peut durer des dizaines, voire des centaines de millions d'années.

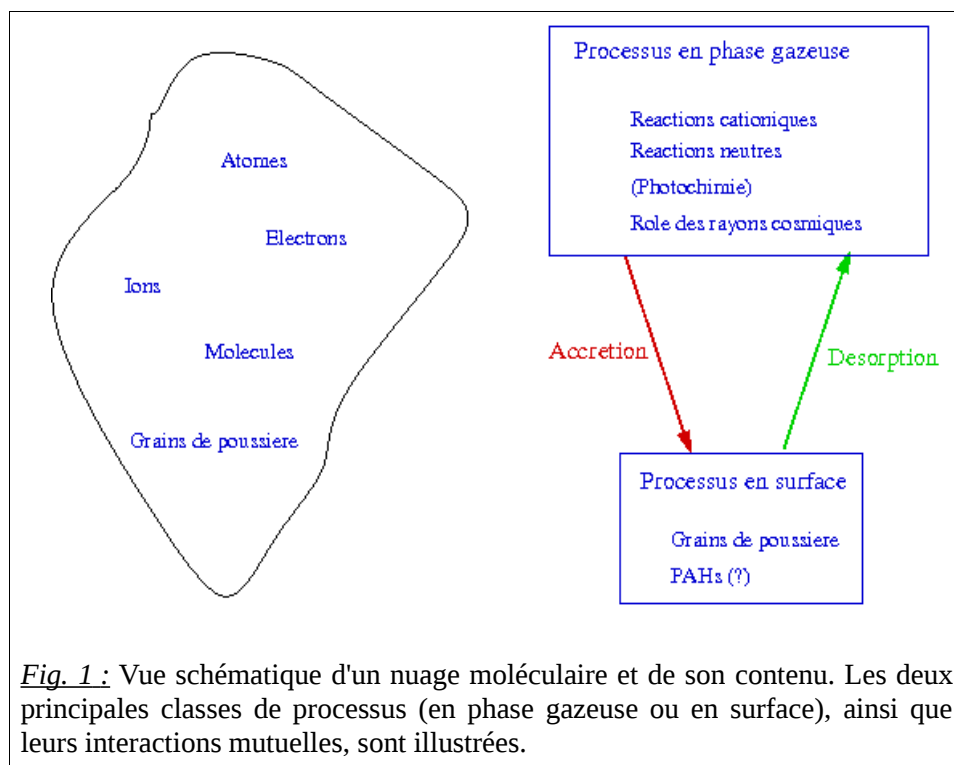


Fig. 1 : Vue schématique d'un nuage moléculaire et de son contenu. Les deux principales classes de processus (en phase gazeuse ou en surface), ainsi que leurs interactions mutuelles, sont illustrées.

Essentiellement, deux classes de processus physico-chimiques vont affecter la chimie du nuage. D'abord, les *processus en phase gazeuse*. Ces processus requièrent principalement l'interaction entre deux partenaires, susceptibles de réagir pour former de nouvelles molécules. Les processus nécessitant l'interaction simultanée entre trois

partenaires ne sont généralement pas pris en compte, parce que trop peu probables. C'est aussi principalement en phase gazeuse que l'on tient davantage compte de l'interaction avec les photons ultraviolets (dissociation et ionisation), du moins dans les régions périphériques du nuage (les régions internes sont essentiellement opaques à la lumière ultraviolette). On tiendra aussi compte des interactions avec des rayons cosmiques : des particules de haute énergie accélérées dans des environnements astrophysiques divers tels que les résidus de supernovae ou encore certaines étoiles massives binaires. Ensuite, il convient de tenir compte des processus en surface. Les poussières interstellaires constituent en effet une phase solide dans la phase gazeuse. A la surface de ces solides, des atomes et molécules peuvent s'adsorber et migrer en surface, permettant ainsi une réaction éventuelle avec d'autres composés déposés sur cette même surface. Ce dépôt en surface permet de catalyser les réactions chimiques (améliorer leur cinétique), c'est pourquoi on parle aussi de catalyse en surface, ou de catalyse hétérogène². Outre la concentration importante des partenaires réactionnels par rapport à la phase gazeuse, la chimie en surface permet aussi de stabiliser des composés qui seraient trop instables en phase gazeuse. Les petites molécules résultant de l'addition de deux composés sont en effet souvent instables (elles contiennent trop d'énergie), ce qui les conduit à se rompre immédiatement. En surface, par contre, le grain de poussière peut absorber l'excès d'énergie qui déstabilise la molécule nouvellement formée, ce qui permet dès lors une stabilisation de celle-ci. Il faut aussi avoir à l'esprit que ces deux classes de processus sont en relation mutuelle : des composés passent de la phase gazeuse vers la surface (accrétion), et des composés adsorbés repassent en phase gazeuse (désorption). Un résumé succinct de ces processus est illustré par la *figure 1*.

Il est intéressant de noter que des molécules assez diverses ont été formellement identifiées dans des nuages interstellaires de ce type. On pourrait citer des alcools tels que le méthanol et l'éthanol, ou encore le diméthyléther, l'acétone, l'acide acétique (dont la dilution dans l'eau donne le vinaigre) ou l'éthylène-glycol (l'antigel!), pour parler de composés d'usage assez courant. D'autre part, des molécules telles que le benzène, le glycolaldéhyde (le plus simple des sucres), ou encore le cyano-aminométhane (un précurseur direct de la glycine, le plus simple des acides aminés) ont aussi formellement été identifiées. Déjà à ce stade, donc, certains environnements interstellaires s'avèrent capables de synthétiser significativement des molécules intéressantes.

Lorsque une perturbation majeure intervient, par exemple une onde de choc produite par une supernova se propageant dans le milieu interstellaire, l'équilibre hydrostatique du nuage peut être rompu, le conduisant à son effondrement. A partir de ce stade, le nuage moléculaire devient une région de formation stellaire. Des fragments de ce nuage vont en effet donner lieu à la formation de nouvelles étoiles. Cette transformation va conduire les conditions physiques à évoluer, et par

² Le mot *hétérogène* est choisi pour illustrer le fait que le milieu réactionnel dans sa totalité n'est pas homogène : il est en effet constitué d'une phase solide plongée dans une phase gazeuse.

conséquent les processus chimiques qui en dépendent vont s'adapter. Ces transformations à grande échelle vont donc avoir un impact à l'échelle moléculaire, que nous allons aborder succinctement au gré des phases de transformation allant du nuage moléculaire aux systèmes planétaires tel que le nôtre.

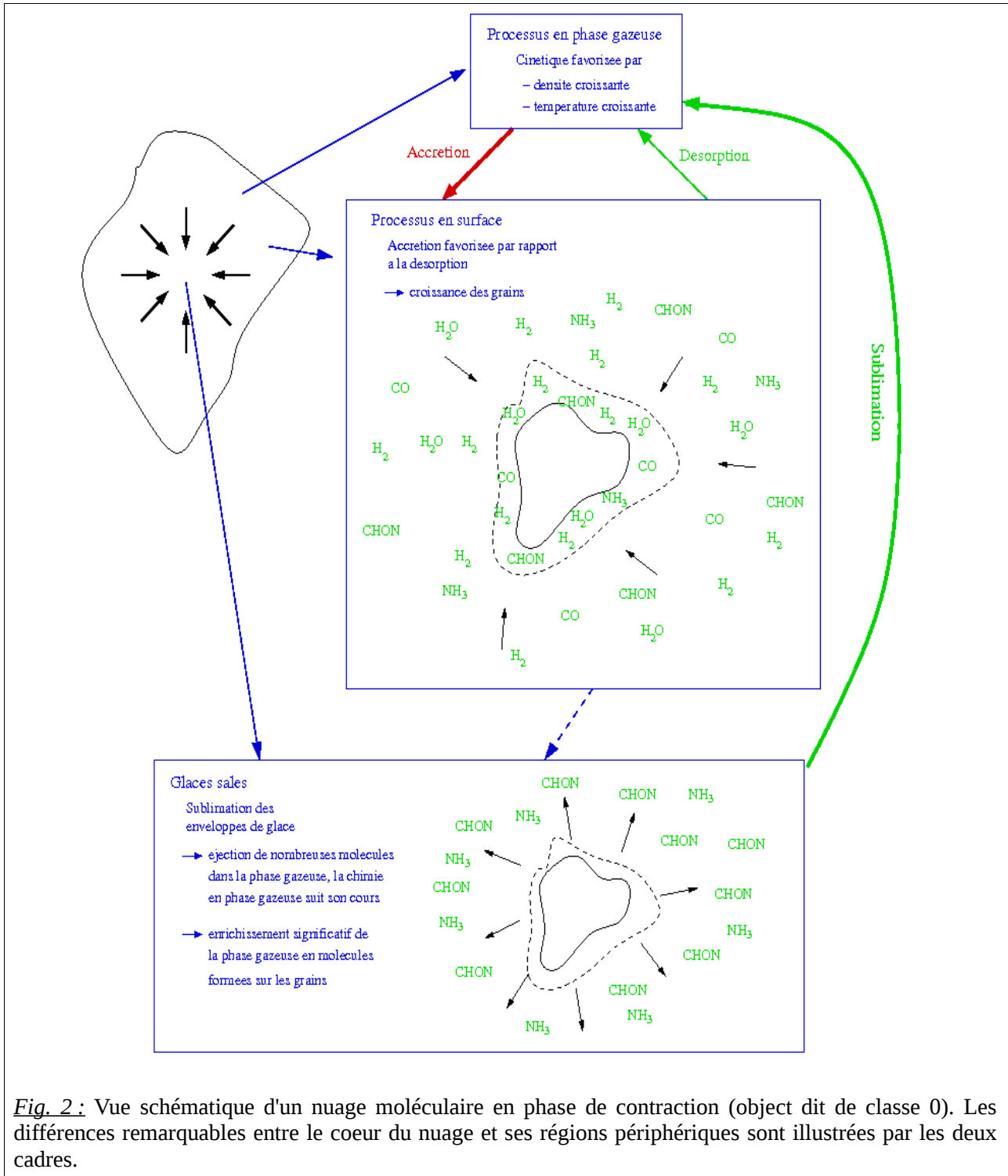


Fig. 2: Vue schématique d'un nuage moléculaire en phase de contraction (objet dit de classe 0). Les différences remarquables entre le coeur du nuage et ses régions périphériques sont illustrées par les deux cadres.

La première phase de contraction est celle de l'objet de classe 0 : un nuage moléculaire en contraction caractérisé par un gradient de densité et de température (toutes deux croissantes en allant de la périphérie vers le centre), tel qu'illustré par la *figure 2*. La densité peut atteindre quelques dizaines ou centaines de millions de particules par centimètre cube, et la température dépasser plusieurs dizaines de K.

Tant les processus en surface qu'en phase gazeuse sont amenés à poursuivre leur oeuvre, mais cette fois dans des conditions de densité et de température plus favorables, puisque ces deux paramètres augmentent au cours de la contraction. De plus, l'accrétion s'accélère, conduisant les grains de poussière à s'entourer de « manteaux glacés » : des couches solides, amorphes, constituées de multiples molécules. Au-delà des processus en surface, les glaces interstellaires sont aussi le théâtre de nouvelles réactions chimiques susceptibles de conduire à des molécules plus complexes à se former. Toutefois, dans la région centrale, la température atteindra un seuil critique de l'ordre de 100 K. Au-delà de cette température, la glace interstellaire ne résiste plus et il y a restitution importante des composés contenus dans les glaces vers la phase gazeuse : on parle alors de sublimation. Deux régions vont donc se distinguer : (i) la partie centrale où les molécules sont relâchées dans la phase gazeuse (absence de glace), et (ii) la périphérie où les molécules sont principalement piégées dans les glaces entourant les poussières (voir *figure 2*).

Au fil du temps, la matière en effondrement va constituer un disque entourant l'objet central (l'étoile en formation). On parlera d'objet de classe I ou II, selon qu'il reste significativement ou non de la matière entourant le disque. A ce stade, la densité atteint des valeurs pouvant localement dépasser 10000 milliards de particules par centimètre cube, ce qui favorise davantage les réactions en phase gazeuse et l'accrétion de matière sur les grains et les glaces. Au sein de ce disque, les processus mentionnés ci-dessus vont continuer à agir.

Toutefois, une particularité importante apparaît : l'objet central se met à émettre du rayonnement UV et des rayons X en grande quantité. Cette nouvelle source de rayonnement va dès lors jouer son rôle dans la chimie de cet environnement (voir *figure 3*). En plus du rayonnement UV potentiellement présent en raison de populations stellaires avoisinantes, et des rayons cosmiques qui traversent le milieu interstellaire, les photons UV et X issus de l'étoile en formation vont donc pouvoir dissocier des molécules. Les fragments résultant de ces dissociations vont pouvoir se recombinaison de multiples manières, conduisant à une plus grande diversité de composés dans les glaces, notamment. Toutefois, à proximité de l'étoile en formation, les conditions sont bien trop hostiles pour garantir le maintien de ces glaces. Même les poussières vont s'éroder et se fragmenter, dans les parties les plus internes.

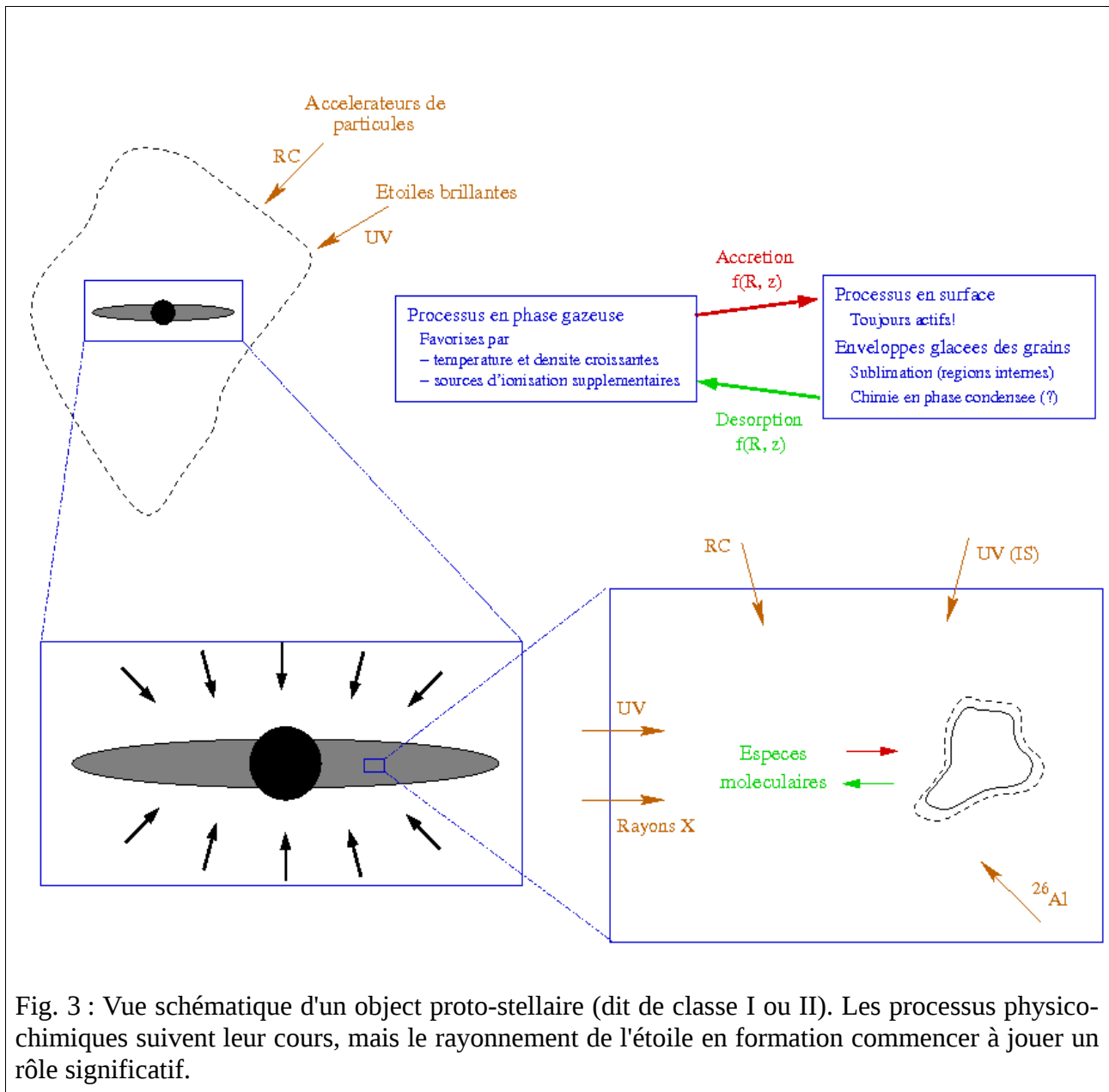
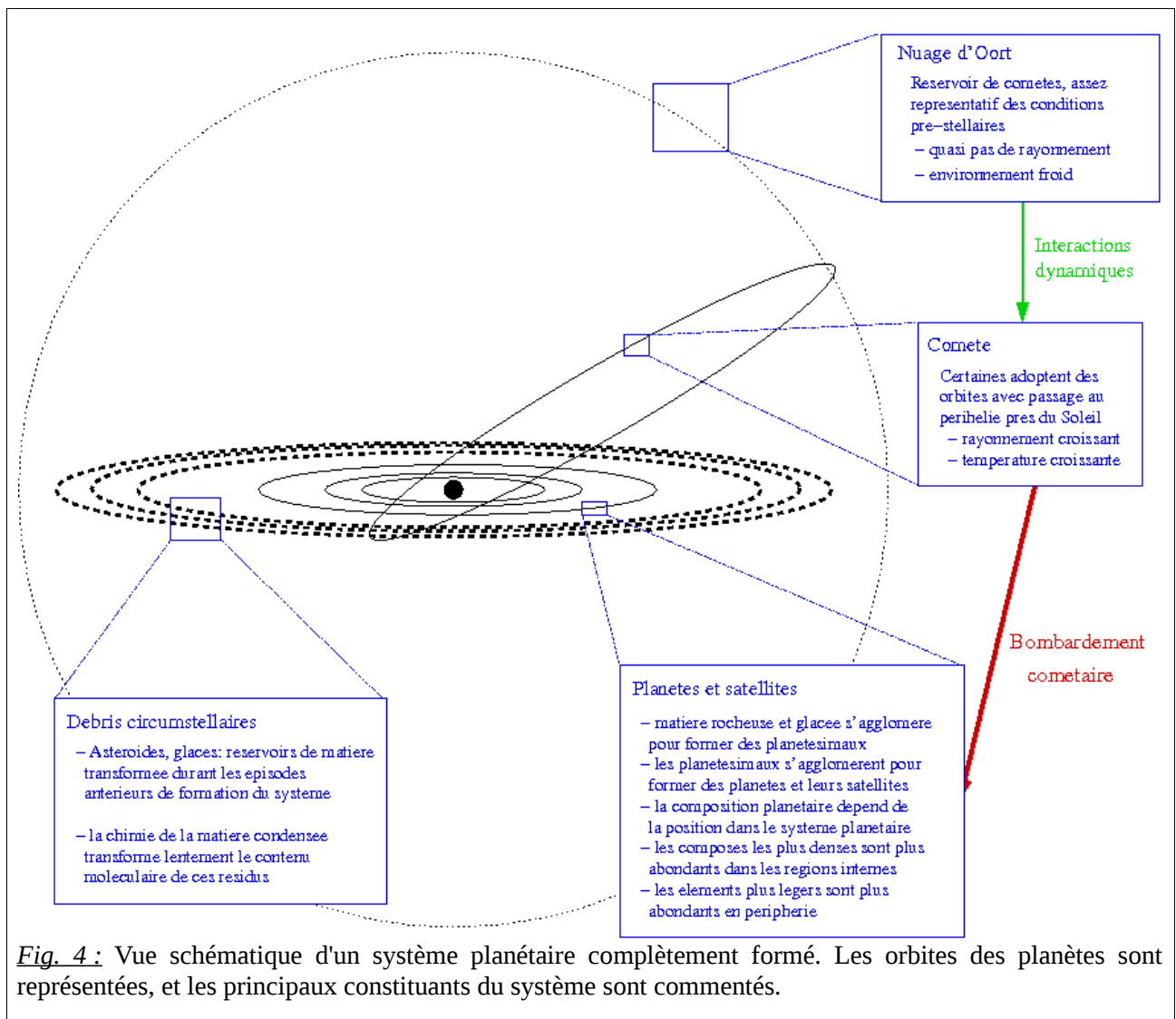


Fig. 3 : Vue schématique d'un objet proto-stellaire (dit de classe I ou II). Les processus physico-chimiques suivent leur cours, mais le rayonnement de l'étoile en formation commencer à jouer un rôle significatif.

A ce stade, le sort qui attend chaque parcelle de matière dans le disque sera le suivant :

- soit la matière tombe sur l'étoile en formation
- soit elle est expulsée vers la périphérie sous l'influence de la pression du rayonnement de l'étoile en formation
- soit elle reste dans le plan du disque et elle participera donc à la formation des planétésimaux (conduisant aux planètes et à leurs satellites) ou à celle des petits corps du système stellaire (comètes et astéroïdes, principalement)

C'est donc à l'issue de cette étape que le système planétaire se constitue, en orbite autour de l'étoile maintenant formée, comme illustré par la *figure 4*. Les orbites des planètes sont quasi coplanaires, et coïncident avec le plan du disque proto-stellaire discuté précédemment. Les astéroïdes qui n'ont pas participé à la formation planétaire sont toujours présents, et la périphérie du système planétaire est riche en glaces et autres résidus solides : dans le cas de notre système Solaire, il s'agit de la Ceinture de Kuiper. Enfin, le réservoir d'une fraction importante des comètes consiste en une sphère centrée sur l'étoile : le Nuage d'Oort. Ces comètes résultent de la croissance de glaces dans le disque proto-stellaire, et contiennent donc bon nombre de molécules précédemment synthétisées (et ensuite éventuellement transformées au sein du corps cométaire). L'expulsion des comètes du disque proto-stellaire pour adopter cette distribution spatiale sphérique pourrait résulter de bouleversements dynamiques importants dans le système stellaire jeune, suite à une migration significative des planètes géantes par rapport à leur orbite de formation. Ce dernier point n'est toutefois pas encore totalement élucidé à l'heure actuelle.



Le point important du point de vue astrochimique est l'existence de ces petits corps (astéroïdes et comètes) contenant des composés résultant des épisodes antérieurs de formation du système planétaire. Les molécules formées dans le nuage moléculaire ont été transformées lors des épisodes successifs de transformation que ce nuage a traversés. L'évolution de l'environnement astrophysique et de ses conditions physiques a permis à de multiples processus physico-chimiques d'altérer les populations moléculaires. Si l'étoile centrale est de faible masse, le temps d'évolution du système pourra être très long. Pour notre Soleil, son temps d'évolution est de l'ordre de 10 milliards d'années. Durant ce laps de temps, des processus chimiques, dans les matrices glacées des comètes ou des inclusions de composés moléculaires dans les roches interplanétaires, pourront se prolonger et altérer davantage le contenu moléculaire de ces objets. Des études récentes démontrent d'ailleurs que de nombreuses molécules particulièrement intéressantes ont été identifiées dans des comètes, y compris plusieurs espèces chimiques déjà identifiées dans des nuages moléculaires. De plus, la sonde Stardust a récemment permis d'identifier la glycine, le plus simple des acides aminés, dans de la poussière éjectée par la comète Wild 2. Il s'agit de la première détection d'un acide aminé en dehors de l'environnement terrestre!

Il convient dès lors de souligner l'apport en composés organiques (au sens chimique du terme) des épisodes de bombardement cométaire qui ont ponctué l'histoire de la Terre à ses débuts.

Une fois que les planètes sont formées, certaines d'entre elles sont susceptibles d'être caractérisées par des conditions de température et de pression permettant à de l'eau d'exister sous forme liquide (voir *figure 5*). Rappelons que, jusqu'à présent, seules les phases gazeuses et solides étaient considérées. Dès lors, l'hydrosphère va servir de réacteur pour toute une chimie en solution incluant solvatation (interaction entre une molécule et les molécules de solvant), réactions acide/base, hydrolyse, etc. A partir de ce stade, tout le patrimoine de connaissance acquis dans le domaine de la chimie en phase aqueuse peut être transposable à cet environnement. D'autre part, le rôle de la lithosphère et de l'atmosphère ne doivent pas être négligés. En ce qui concerne l'atmosphère, il est important de noter que les processus en phase gazeuse qui agissaient dans les environnements interstellaire et proto-stellaire sont toujours d'actualité. L'environnement atmosphérique est toutefois caractérisé par des densités nettement plus élevées que précédemment, avec une densité décroissante en fonction de l'altitude. Cela conduit notamment à ne plus pouvoir négliger les collisions à trois partenaires, devenues significatives. De plus, la température dépasse allègrement celle des environnements interstellaires. Pour ce qui est de la photochimie, elle est également active, et ce jusqu'à différentes altitudes en fonction de la composition de cette atmosphère et de la longueur d'onde de la lumière considérée.

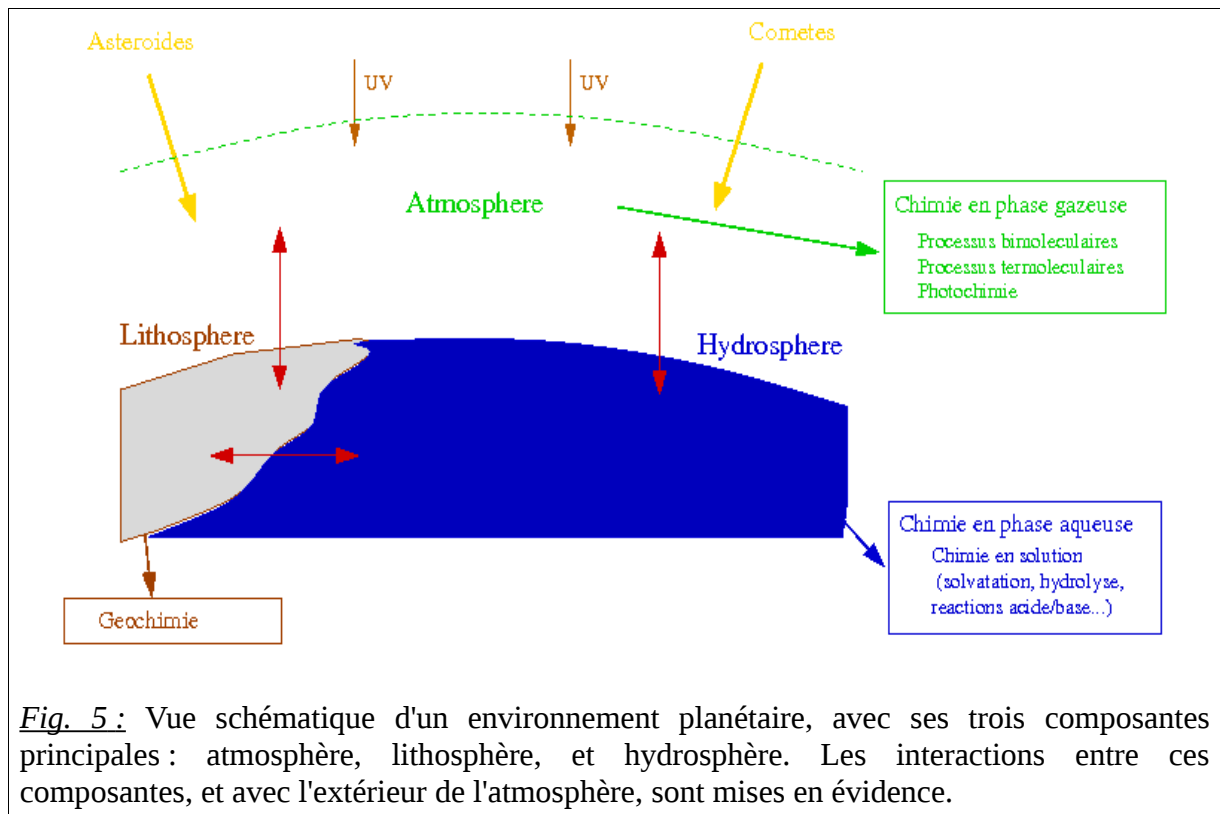


Fig. 5 : Vue schématique d'un environnement planétaire, avec ses trois composantes principales : atmosphère, lithosphère, et hydrosphère. Les interactions entre ces composantes, et avec l'extérieur de l'atmosphère, sont mises en évidence.

Enfin notons que même si nos connaissances actuelles nous permettent de dire que la Terre prébiotique disposait de tout le nécessaire pour synthétiser in situ les premières molécules intéressantes du point de vue de l'origine de la vie, il est fermement établi qu'un apport substantiel de ces molécules est d'origine cométaire ou météoritique.

Le mot de la fin...

Ce cheminement suivi par la matière sous forme moléculaire au cours des diverses transformations des environnements astrophysiques constitue toute la question de la *filiation moléculaire*, une question au centre des préoccupations de l'astrochimie.

Les éléments qui constituent cet exposé sont basés sur de nombreux faits établis, ainsi que sur un état des lieux en constante évolution de notre connaissance des processus physico-chimiques, et de l'astrophysique. Les progrès récents ont beau être importants, ils ne sont rien en comparaison de l'étendue des incertitudes qui affectent notre vision des choses. Des progrès substantiels sont attendus dans le futur, notamment grâce à de nombreux projets d'observatoires ou encore de missions d'exploration du système Solaire.

L'exposé de cette question scientifique démontre l'importance des approches pluridisciplinaires pour aborder des questions scientifiques qui s'étendent bien au-delà des frontières artificielles imposées aux disciplines scientifiques. Cette question de la filiation moléculaire au travers des environnements astrophysiques démontre l'intérêt de combiner astrophysique, chimie, physique, et éventuellement d'autres domaines en vue d'apporter des éléments de réponse à de nombreuses questions qui tourmentent les chercheurs.