

L'information permet l'existence. L'organisation permet l'émergence. La relation permet l'évolution.

Depuis le début de cet ouvrage, un même phénomène semble se répéter, quelle que soit l'échelle à laquelle on l'observe.

L'Univers n'a pas commencé par des galaxies, des planètes ou des êtres vivants. Il est d'abord apparu sous la forme d'une organisation extrêmement simple : quelques lois fondamentales, quelques particules élémentaires et leurs interactions.

Puis, au fil du temps, ces éléments se sont associés pour former les atomes. Les atomes se sont assemblés en molécules. Parallèlement, à des échelles beaucoup plus vastes, la matière s'organisait pour former les étoiles, les galaxies et les planètes.

Puis, sur notre Terre, quelque chose de radicalement nouveau est apparu : la vie.

Nous ne savons toujours pas précisément comment le passage s'est effectué. Mais, une fois les premières cellules apparues, un autre processus a commencé. Les cellules se sont diversifiées, certaines se sont associées en organismes, les organismes ont formé des populations, puis des écosystèmes où les espèces dépendent, directement ou indirectement, les unes des autres.

À chaque étape de cette évolution, la nouveauté ne nécessite pas forcément l'apparition de nouvelles règles, mais peut résulter d'une organisation plus riche des éléments déjà présents.

Quelques lois suffisent à construire les galaxies.

Quatre bases suffisent à écrire l'ADN. Les mêmes gènes Hox permettent de construire une mouche, un poisson, un oiseau ou un être humain.

Quelques dizaines de milliards de neurones, reliés entre eux, font émerger la pensée.

Dans tous ces exemples, **l'information** seule ne suffit pas. C'est son **organisation** qui permet, à partir d'un nombre limité de lois ou d'éléments, de faire apparaître une complexité.

Prises isolément, les lois physiques ne construisent pas de galaxies, pas plus que les informations génétiques ne construisent un organisme ou que l'activité de neurones isolés ne fait émerger la pensée.

Ce qui change tout, c'est leur organisation.

L'évolution semble alors franchir une étape essentielle. Au commencement, l'information est indispensable. Mais à mesure que les structures deviennent plus complexes, ce qui devient déterminant n'est plus seulement la quantité d'information disponible ; c'est la manière dont elle est organisée.

Cette organisation permet de faire apparaître des structures qui possèdent désormais leur propre existence : des atomes, des molécules, des cellules puis des organismes vivants... Chacun de ces ensembles constitue une nouvelle étape dans la complexité.

Mais une fois constitués, ces ensembles peuvent, à leur tour, participer à la formation d'ensembles plus vastes encore, en entrant **en relation**.

Une cellule isolée ne forme pas un organisme.

Un organisme isolé ne constitue pas un écosystème.

Et ces relations ouvrent la voie à une nouvelle étape de complexité.

Une fleur ne peut souvent se reproduire sans les insectes qui la pollinisent. Les champignons et les racines des arbres échangent en permanence des nutriments au sein de vastes réseaux souterrains. Les coraux vivent grâce à leurs algues microscopiques. Les bactéries de notre microbiote participent à notre digestion, à notre immunité et probablement à bien d'autres fonctions encore. Dans la nature, la compétition existe, mais la vie ne pourrait se maintenir sans une multitude d'associations, de coopérations et d'interdépendances.

Et si l'évolution ne consistait pas seulement à produire des structures toujours plus complexes, mais surtout à développer des organisations toujours plus riches en relations ?

Cette importance des relations dans l'organisation du vivant fait étrangement écho à un thème récurrent des témoignages d'expériences de mort imminente : le sentiment que tout est profondément relié.

Malgré la diversité des personnes, des cultures et des croyances, la grande majorité rapporte qu'au terme de leur expérience, ce ne sont ni leurs réussites matérielles ni leurs connaissances qui leur semblent essentielles, mais **la qualité de leurs relations avec les autres, les gestes d'entraide qu'ils ont accomplis, l'amour qu'ils ont donné ou refusé de donner.**

Ces témoignages ne constituent évidemment pas une preuve. Mais la convergence de ces témoignages suffit à nourrir la réflexion.

**Et si notre existence terrestre n'était pas seulement une aventure individuelle ?
Et si elle participait à un apprentissage plus vaste, où chaque expérience, chaque rencontre, chaque difficulté contribuerait à enrichir une organisation qui nous dépasse ?**

Peut-être la question fondamentale n'est-elle pas seulement :
Comment l'Univers est-il apparu ?

Peut-être est-elle aussi :
Vers quel type d'organisation l'Univers tend-il ?

Si l'évolution de la matière a conduit à la vie, si celle de la vie a conduit à la conscience, et si la conscience elle-même continue d'évoluer, alors il n'est peut-être pas déraisonnable d'imaginer que l'étape suivante concerne **la qualité de nos relations.**

Non seulement entre les êtres humains, mais entre toutes les formes du vivant.

Et si l'évolution du vivant avançait continuellement dans cette direction relationnelle, ne devrions-nous pas nous interroger sur la nôtre. Suivons-nous ce chemin ?

Si cette hypothèse était juste, alors prendre soin des autres et préserver le monde vivant ne seraient plus seulement de belles intentions. **Ils deviendraient peut-être l'une des expressions les plus profondes de l'évolution elle-même, et aussi une condition indispensable à notre propre avenir.**

Nous passons souvent une grande partie de notre vie à chercher ce qui nous manque. Et si le véritable progrès consistait plutôt à découvrir ce que nous pouvons apporter ? Un sourire, une écoute, un encouragement, une idée, un geste de solidarité paraissent parfois insignifiants. Pourtant, dans un système où tout est relié, la plus petite action peut avoir des répercussions que nous n'imaginerons jamais.

Dans cette perspective, vivre pleinement sa vie ne signifie plus seulement réussir matériellement ou accumuler des connaissances. Cela consiste peut-être avant tout à

participer, le mieux possible, à cette **immense trame de relations** dont nous faisons tous partie. Les animaux, les végétaux, les écosystèmes, l'humanité tout entière... rien n'existe véritablement de manière isolée.

Et cette importance de la relation ne commence pas avec le vivant. Nous l'avons rencontrée à toutes les échelles : les particules interagissent, les atomes se lient pour former des molécules, les astres s'organisent en systèmes, les galaxies elles-mêmes interagissent entre elles. Du plus petit au plus grand, la relation semble partout essentielle à l'organisation de ce qui existe.

À quoi servent toutes ces relations ? Dans quel but ?

Et si cette évolution vers des organisations toujours plus riches en relations avait une direction ?

Et si l'un des buts de notre passage sur Terre était précisément d'enrichir ces liens, d'apprendre à mieux vivre avec les autres et, par notre expérience individuelle, de contribuer à quelque chose de plus vaste que nous ?

Notre existence biologique pourrait alors n'être qu'une étape, **une expérience incarnée au cours de laquelle chacun de nous participerait, à sa mesure, à l'évolution de cet ensemble.**

Cette appartenance à un ensemble plus vaste s'arrête-t-elle nécessairement à notre existence biologique ?

Et si la mort n'était pas une fin, mais le passage vers une autre étape d'une réalité que nous ne percevons aujourd'hui qu'en partie ?

Personne ne peut aujourd'hui répondre avec certitude.

Puisque nous ne savons pas, pourquoi envisager uniquement la mort comme une fin à redouter ?

Si, après notre mort, nous découvrons que notre existence se poursuit sous une autre forme, notre vie terrestre serait une étape précieuse d'un chemin beaucoup plus vaste. Une expérience où chacun apporte sa part, apprend des autres et contribue, à sa mesure, à l'évolution de l'ensemble.

Et si ce n'est pas le cas ?

Cette question rappelle le célèbre pari de Pascal. Au XVII^e siècle, le mathématicien et philosophe Blaise Pascal développe dans ses *Pensées* un raisonnement devenu célèbre. Puisque la raison ne permet pas de trancher avec certitude la question de l'existence de Dieu, il propose de l'envisager comme un pari : **si Dieu existe, croire peut conduire à un gain infini ; s'il n'existe pas, la perte reste limitée.**

Ne pourrions-nous pas appliquer un raisonnement comparable à l'hypothèse que nous venons d'explorer ?

Si elle est fausse, qu'aurons-nous perdu à vivre avec davantage de bienveillance, de respect, de curiosité et d'amour ? Bien au contraire, **ce choix aura été bénéfique pour nous-mêmes, pour les autres et pour le monde vivant.**

Pourquoi pas ?

Au fil de ces recherches

Je pensais écrire un livre sur l'origine de l'Univers et de la vie. Mais au fil de mes recherches, j'ai découvert la Nature, son extraordinaire complexité, son ingéniosité, sa beauté.

Avant, elle faisait simplement partie du décor. Je la regardais sans vraiment la voir. Et ce qui me reste aujourd'hui de ce long voyage, c'est bien plus que des connaissances :

une admiration sans limites et un respect profond pour cette Nature que j'en suis venue à vénérer.

Aujourd'hui, je ne regarde plus un arbre, un oiseau, une fleur ou même le plus petit des insectes, comme avant. Chacun d'eux me rappelle qu'il est le fruit d'une histoire vieille de plusieurs milliards d'années, d'une évolution extraordinaire dont nous faisons, nous aussi, partie. Tout ce qui vit me semble désormais relié par une même aventure.

Mon émerveillement a commencé le jour où j'ai observé la Nature et découvert cette multitude de vies qui se déroulent simultanément autour de moi.

Je ne vois plus seulement un oiseau, une fourmi ou un papillon. J'imagine un être vivant occupé à vivre sa journée : chercher sa nourriture, éviter les dangers, retrouver les siens, construire un nid, protéger sa progéniture ou simplement continuer son chemin. Leur existence est minuscule à nos yeux, mais pour eux, elle est tout aussi précieuse que la nôtre l'est pour nous.

Cette manière de regarder le vivant a fait naître en moi une forme d'empathie que je ne connaissais pas autrefois. Je me surprends à déplacer un insecte plutôt qu'à le tuer, à ressentir une véritable tristesse devant un arbre abattu. Si je reçois un bouquet de fleurs, j'apprécie ce geste attentionné, mais j'ai aussi un pincement au cœur : je me dis que ces fleurs n'auront pas pu vivre leur vie jusqu'au bout.

Je ne vois plus les autres formes de vie comme de simples éléments du décor ou comme des ressources. Elles sont les autres voyageurs de cette immense aventure qu'est la vie.

Plus j'observe la nature, moins je la vois comme une juxtaposition d'espèces en compétition. J'y découvre un immense réseau de relations, d'équilibres, de dépendances réciproques et de coopérations patientes.

Et c'est peut-être cela qui me touche le plus. Nous ne sommes pas séparés du reste du vivant. Nous en sommes une expression parmi d'autres.

Et nous sommes probablement la seule espèce capable de prendre conscience de cette immense trame. Pourtant, nous oublions si souvent que nous en faisons partie.

Je ne vous demande pas de partager ce sentiment. Je vous propose simplement de poursuivre ce chemin avec moi. Peut-être y trouverez-vous, vous aussi, des raisons d'éprouver le même émerveillement. Ou peut-être ce voyage fera-t-il naître en vous un regard différent. Dans les deux cas, il en aura valu la peine.

Quand nos inventions redécouvrent la nature

Pendant longtemps, nous avons considéré la nature comme une ressource à exploiter et la technologie comme un moyen de nous en affranchir. Plus nos inventions semblaient s'éloigner du fonctionnement du vivant, plus nous avions le sentiment de progresser.

Pourtant, une observation différente s'impose aujourd'hui.

À mesure que nos connaissances augmentent, nos technologies semblent emprunter un chemin exactement inverse.

Les réseaux de neurones **artificiels** s'inspirent du fonctionnement du cerveau.

Les **algorithmes génétiques** reproduisent les mécanismes de l'évolution.

Les **essaims de robots** coopèrent comme les colonies de fourmis ou d'abeilles.

Les **systèmes informatiques distribués** recherchent une robustesse que les écosystèmes maîtrisent naturellement depuis des centaines de millions d'années.

Et ce phénomène dépasse largement le domaine de l'informatique.

En architecture, les systèmes de ventilation passive imitent les termitières africaines capables de maintenir une température presque constante malgré des écarts de plusieurs dizaines de degrés entre le jour et la nuit.

Le nez profilé de certains trains à grande vitesse s'inspire du bec du martin-pêcheur afin de réduire les turbulences et la consommation d'énergie.

Le Velcro est né de l'observation des fruits de bardane qui s'accrochent naturellement aux poils des animaux.

Les ailes des oiseaux ont inspiré l'aéronautique. Les nageoires des baleines inspirent aujourd'hui de nouvelles éoliennes plus silencieuses et plus efficaces.

Certains revêtements reproduisent la structure de la peau des requins afin de diminuer les frottements et de limiter le développement des bactéries.

Même notre manière de produire et de gérer les ressources évolue dans cette direction. Pendant longtemps, nous avons fonctionné selon un modèle linéaire : extraire, fabriquer, utiliser, jeter.

La nature, elle, ne connaît pas le déchet.

Les feuilles mortes deviennent l'humus qui nourrira les arbres.

Les excréments deviennent une ressource pour d'autres organismes.

Les cadavres retournent progressivement à la terre.

Le dioxyde de carbone rejeté par les animaux devient une matière première indispensable aux végétaux.

L'eau circule sans cesse entre océans, atmosphère, sols et êtres vivants.

Dans les écosystèmes, ce qui semble être un déchet pour l'un devient une ressource pour un autre.

Aujourd'hui, nous cherchons nous aussi à produire du biogaz à partir de déchets organiques, à transformer les eaux usées en ressources, à recycler les matériaux ou à développer une économie circulaire. Là encore, nous avons parfois l'impression d'innover, alors que nous retrouvons des principes que le vivant applique depuis toujours.

Une discipline entière est née de cette prise de conscience : le biomimétisme.

Son idée est remarquablement simple.

Au lieu de chercher à dominer la nature, pourquoi ne pas apprendre d'elle ?

Après près de quatre milliards d'années d'évolution, le vivant a déjà expérimenté une quantité inimaginable de solutions. Beaucoup se sont révélées inefficaces et ont disparu. D'autres ont traversé le temps parce qu'elles étaient robustes, économes en énergie et capables de s'adapter aux changements.

Le plus étonnant n'est peut-être pas que nous imitions aujourd'hui la nature. C'est que nous ayons mis si longtemps à réaliser qu'elle avait déjà résolu nombre des problèmes auxquels nous sommes aujourd'hui confrontés.

Cette inversion de perspective est intéressante.

Depuis l'apparition de l'informatique, nous comparons souvent le fonctionnement de l'Univers à celui d'un ordinateur. Nous parlons de programmes, d'information, de mémoire, de réseaux ou d'algorithmes.

Et si nous inversions le raisonnement ?

Et si ce n'était pas la nature qui ressemblait à nos ordinateurs, mais nos ordinateurs qui finissaient progressivement par ressembler à la nature ?

Nous croyons souvent inventer des principes entièrement nouveaux.

Pourtant, plus nos technologies progressent, plus elles convergent vers des principes d'organisation déjà présents dans le monde vivant : des informations distribuées, des décisions prises localement qui produisent un ordre global, des réseaux, de l'auto-organisation, de la coopération, de la résilience et une remarquable capacité d'adaptation.

Une question me vient alors à l'esprit.

Nous nous considérons comme des êtres particulièrement intelligents.

Il nous a fallu pourtant des siècles de connaissances accumulées, des laboratoires, des chercheurs, des ingénieurs et des technologies de plus en plus sophistiquées pour découvrir des solutions que la nature utilise parfois depuis des millions d'années.

Et même lorsque nous les comprenons, **nous sommes encore loin de parvenir à reproduire tout ce que la nature accomplit.**

Elle ne dessine pas les plans d'une termitière, ne calcule pas le profil du bec d'un martin-pêcheur et ne programme pas le fonctionnement d'un écosystème. Et pourtant, une simple feuille est capable de capter l'énergie du Soleil, d'utiliser l'eau et le dioxyde de carbone pour fabriquer de la matière organique et de libérer de l'oxygène : un processus dont dépend une grande partie de la vie sur Terre et que, malgré toutes nos connaissances, nous sommes encore bien loin de savoir reproduire dans toute sa complexité et avec une telle autonomie.

Et ce n'est qu'un exemple parmi tant d'autres.

Nous savons construire des ordinateurs d'une puissance extraordinaire, mais pas un cerveau. Nous savons fabriquer des machines d'une complexité prodigieuse, mais pas une cellule vivante capable de se nourrir, de se réparer et de se reproduire.

Nous imitons certains matériaux naturels, certains réseaux, certaines formes d'organisation, **sans parvenir à égaler tout ce que le vivant réalise spontanément.**

Alors, qui est réellement le plus intelligent ?

Nous avons longtemps réservé ce mot à notre propre capacité de réfléchir, de comprendre, d'anticiper et d'inventer. La nature, elle, ne réfléchit, probablement, pas.

Et pourtant, **nous passons une partie de notre temps à essayer de comprendre comment elle agit, à reproduire ses solutions et à nous en inspirer pour améliorer les nôtres.**

Il y a là un paradoxe qui m'interpelle.

Comment pouvons-nous considérer la nature comme dépourvue d'intelligence alors que notre propre intelligence prend ses créations pour modèles et ne parvient toujours pas à reproduire nombre d'entre elles ?

Peut-être le mot *intelligence* ne doit-il pas nécessairement désigner une pensée consciente semblable à la nôtre.

Pourrait-il exister une autre forme d'intelligence, inscrite dans l'organisation même de la matière, du vivant et de leurs relations ?

Je n'en sais rien.

Mais la question mérite d'être posée.

Je reviens encore aux expériences de mort imminente.

Au fil de mes recherches, j'ai souvent été frappée par les étonnantes similitudes qui semblent apparaître entre des domaines que tout oppose en apparence.

Alors, pourquoi ne pas poursuivre ce jeu des analogies ?

Après tout, si nos technologies redécouvrent progressivement des principes d'organisation que la nature met en œuvre depuis toujours, et si, de plus en plus, nous les reproduisons sans toujours en prendre conscience, est-il totalement déraisonnable d'imaginer qu'elles puissent, un jour, nous aider à mieux comprendre certains témoignages d'expériences de mort imminente ?

Essayons.

Je n'affirme évidemment rien. Je partage simplement une intuition.

Le **cloud**, par exemple, nous a familiarisés avec une idée qui aurait paru étrange il y a encore quelques décennies : **ce que nous consultons sur un appareil ne se trouve pas nécessairement dans cet appareil**. L'ordinateur ou le téléphone peut n'être que l'interface permettant d'accéder à une information stockée ailleurs.

Cette image me fait penser à l'idée d'une conscience qui ne serait pas entièrement localisée dans le cerveau, comme certains témoignages d'EMI semblent le suggérer. Ils racontent que, durant leur EMI, ils ont l'impression d'accéder soudainement à une connaissance totale, comme si les réponses à toutes leurs questions devenaient immédiatement accessibles.

Notre cerveau pourrait-il alors être non pas le lieu où toute la conscience est produite et contenue, mais une sorte d'interface lui permettant d'interagir avec notre monde physique ?

Cette idée d'une réalité dépassant celle à laquelle nous avons directement accès n'est pas nouvelle. Sous des formes très différentes, elle traverse les époques et les cultures. Des courants philosophiques ou religieux évoquent une conscience universelle ou un principe qui dépasserait l'individu ; d'autres traditions parlent d'anges gardiens, de daïmons ou d'esprits protecteurs.

Pourquoi retrouve-t-on, sous des noms différents, ces intuitions à travers des civilisations qui ne se sont pourtant jamais rencontrées ? Auraient-elles tenté, chacune avec son propre langage, d'exprimer quelque chose de semblable ?

Ces interrogations nous conduisent à une question plus générale : connaissons-nous réellement toutes les dimensions de la réalité dans laquelle nous vivons ?

L'hypothèse d'une conscience qui pourrait exister au-delà du cerveau nous paraît difficile à concevoir. Mais la physique elle-même nous montre que des aspects essentiels de l'Univers échappent encore à notre compréhension.

La physique moderne a révélé des pans entiers de l'Univers que nous ne comprenons encore que très partiellement.

Nous ignorons toujours la nature de **la matière noire et de l'énergie sombre**, alors même qu'elles occupent une place majeure dans notre modèle actuel du cosmos (**95%**). Nous pouvons en observer les effets et les intégrer à nos modèles sans pour autant savoir ce qu'elles sont réellement.

Voilà déjà une étrange leçon : quelque chose peut jouer un rôle essentiel dans la réalité physique tout en échappant encore à notre compréhension de sa véritable nature.

Une autre énigme fondamentale demeure.

Dans l'Univers primordial, **matière et antimatière semblent avoir été produites en quantités « presque » égales**. Or, lorsqu'elles se rencontrent, elles s'annihilent en libérant de l'énergie. Si elles avaient existé en quantités parfaitement identiques, toute la matière aurait ainsi disparu. Pourtant, un **infime excès de matière** a subsisté, permettant plus tard la formation des étoiles, des planètes et finalement du vivant.

Pourquoi cet excès ? C'est l'une des grandes énigmes encore non résolues de la physique.
Et où est passée l'antimatière de cette matière restante ?

À ces mystères s'ajoutent ceux que nous avons déjà rencontrés, comme **l'intrication quantique**, ce phénomène par lequel deux particules peuvent partager un même état quantique, de telle sorte que leurs propriétés restent corrélées même lorsqu'elles sont très éloignées l'une de l'autre. **Elle nous oblige à remettre en question certaines de nos représentations les plus intuitives de la séparation et de la relation.**

Aucun de ces phénomènes ne démontre évidemment quoi que ce soit concernant la conscience ou les expériences de mort imminente.

Ce n'est pas ce que je veux leur faire dire. Mais ils me conduisent tous à la même prudence : **ce que nous comprenons aujourd'hui de la réalité est encore très loin d'en épuiser les mystères.**

Dès lors, lorsque certains expérienceurs affirment avoir perçu une réalité différente de celle à laquelle nous avons habituellement accès, **pouvons-nous être sûrs qu'une telle réalité est impossible, simplement parce que nous ne savons pas aujourd'hui comment l'expliquer ?**

Certains phénomènes, aujourd'hui étudiés séparément, pourraient-ils un jour se révéler liés d'une manière que nous ne soupçonnons pas encore ?

Au fil de mes recherches, ces interrogations ont peu à peu fait naître en moi certaines intuitions. Des rapprochements auxquels je n'aurais jamais pensé auparavant, et qui, sans constituer des réponses, m'ouvrent de nouvelles pistes de réflexion. Nous aurons l'occasion d'y revenir et de les développer plus loin dans ce livre.

Ce qui m'interpelle, c'est que des témoignages d'EMI, des intuitions anciennes et les découvertes de la physique moderne m'amènent, par des chemins très différents, à m'interroger sur les limites de notre perception.

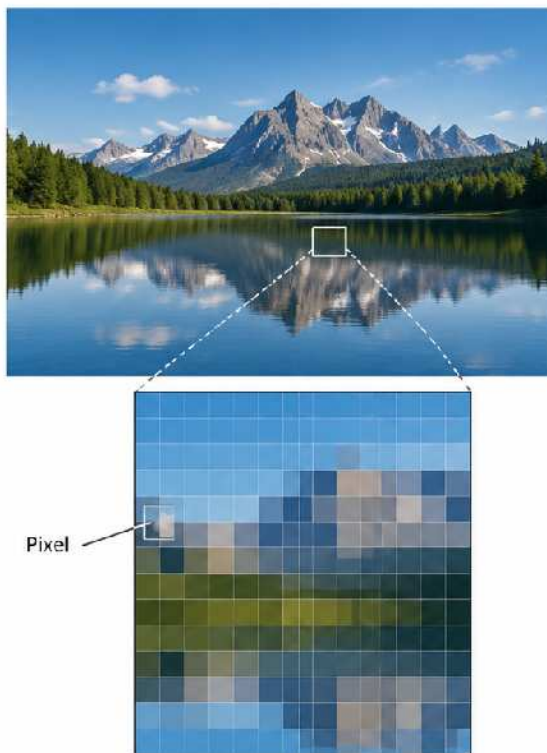
Notre réalité est-elle LA réalité ?

L'analogie avec les pixels offre, à ce titre, une image intéressante.

Une image numérique qui nous paraît parfaitement continue est constituée d'une multitude de pixels distincts.

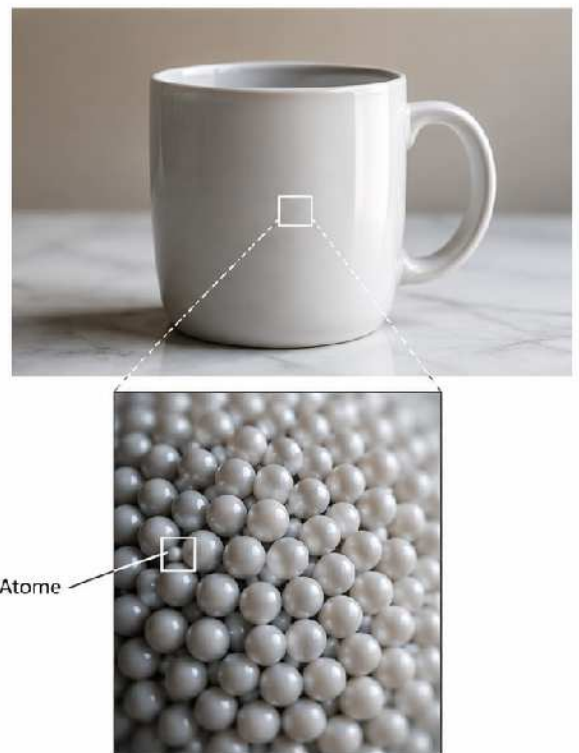
Il en va de même de la matière : à notre échelle, elle nous paraît continue, alors qu'à l'échelle microscopique, elle est constituée d'atomes.

Une image faite de pixels



Une image est formée d'une multitude de pixels, chacun ayant une couleur.

Un objet fait d'atomes



Un objet matériel est formé d'une multitude d'atomes, chacun ayant ses propriétés.

Ce qui nous paraît continu est constitué d'une multitude d'éléments distincts.

Cette constatation a le mérite de nous rappeler que ce que nous percevons de la réalité ne correspond pas nécessairement à sa structure profonde.

Le **cloud** nous a familiarisés avec une information accessible sans être stockée dans le terminal qui nous la restitue. Les **pixels** nous montrent qu'une apparente continuité peut naître d'éléments discrets. Les **réseaux** nous apprennent à penser une information, distribuée plutôt que centralisée.

Nos inventions ne changent pas seulement ce que nous sommes capables de faire, elles changent aussi ce que nous sommes capables d'imaginer. Profitons donc de ces nouvelles

connaissances, qui bouleversent notre vision du monde et de l'Univers, pour oser remettre en question nos croyances et ne pas rester prisonniers de nos certitudes.

Alors, qu'essayons-nous réellement de comprendre ?

Au fil des chapitres, nous avons exploré des domaines aussi différents que la physique, l'Univers, la matière, la nature, le fonctionnement du corps humain ou encore la conscience. Nous avons également envisagé plusieurs hypothèses concernant la nature même de l'Univers. Chacun de ces domaines possède son propre langage, ses propres méthodes et ses propres objets d'étude. Pourtant, au fil de cette exploration, une impression s'est progressivement imposée : malgré leurs différences, ils semblent parfois révéler des logiques proches.

À plusieurs reprises, nous avons vu apparaître les mêmes notions : l'information, l'organisation, les relations entre les éléments, l'émergence de nouvelles propriétés lorsque ces éléments s'assemblent en structures toujours plus complexes. Que l'on observe une cellule, un organisme, un écosystème, une galaxie ou l'Univers dans son ensemble, certaines façons de s'organiser semblent réapparaître.

Ces convergences ne sont-elles que des coïncidences ? Ou traduisent-elles l'existence de principes d'organisation qui traverseraient les différents niveaux du réel ? Que notre Univers soit le monde d'origine, qu'il repose sur une architecture holographique, qu'il soit le fruit d'une civilisation très avancée ou la reproduction d'une réalité plus fondamentale, une même interrogation demeure : existe-t-il des principes d'organisation suffisamment généraux pour traverser toutes ces visions ?

Pour l'instant, il n'est pas nécessaire de déterminer laquelle de ces 4 hypothèses est la bonne. Plus intéressant encore est peut-être d'observer ce qu'elles ont en commun.

Les analogies que nous avons rencontrées jusqu'ici ne nous disent peut-être pas ce qu'est l'Univers. En revanche, elles pourraient nous renseigner sur la manière dont il s'organise.

L'histoire des sciences nous montre d'ailleurs que les grandes avancées commencent souvent par la découverte de régularités, avant même que leur origine ne soit comprise.

Lorsque Newton établit que la chute d'une pomme et le mouvement de la Lune obéissent à une même loi, il ne révèle pas la nature de la gravitation ; il met en évidence un principe commun.

Einstein, à son tour, montre que l'espace et le temps, longtemps considérés comme deux réalités distinctes, sont intimement liés et forment une même structure : l'espace-temps. Il révèle également que la gravitation n'est pas simplement une force d'attraction, mais une manifestation de la courbure de cet espace-temps.

Nous ne savons peut-être pas encore ce qu'est l'Univers. Mais nous pouvons déjà nous demander si certains principes d'organisation ne se retrouvent pas partout où apparaissent de nouvelles formes de complexité.

C'est précisément ce que nous allons explorer dans les pages qui suivent. Non pour démontrer que la physique, le vivant et l'Univers obéissent aux mêmes lois, mais pour observer si certaines logiques d'organisation se retrouvent lorsqu'on les compare en détail.

La Relativité nous invite d'ailleurs à adopter ce regard. Avec celle-ci, l'espace et le temps cessent d'être de simples décors immuables pour devenir des acteurs de la dynamique de l'Univers. La physique quantique, quant à elle, nous oblige à abandonner une part de notre intuition sur la matière et sur le vide.

C'est peut-être en acceptant de regarder, autrement, ces différentes disciplines que certaines analogies prendront tout leur sens.

Le vide, que nous avons longtemps imaginé comme une absence de toute chose, en est sans doute l'un des exemples les plus surprenants.

Le vide qui n'en est pas un

Pendant des siècles, le vide a été considéré comme une simple absence de matière. La physique moderne en donne une image bien différente.

Le vide quantique n'est plus un « rien ». Il est le siège permanent de champs et de fluctuations qui participent aux phénomènes observés.

Ce changement de perspective est peut-être plus profond qu'il n'y paraît. Il nous rappelle que nous accordons spontanément notre attention aux objets et beaucoup moins aux milieux dans lesquels ils évoluent. Pourtant, ces milieux conditionnent leurs mouvements, leurs échanges et parfois même leur existence.

L'air nous paraît vide, alors qu'il transporte chaleur, humidité, sons, odeurs, pollen et graines. Ses mouvements redistribuent l'énergie autour de la planète, participent au cycle de l'eau et façonnent les climats. Invisible, il nous relie au monde vivant à chaque respiration et rend notre existence possible.

L'eau semble transparente, mais elle transporte chaleur, nutriments et organismes vivants, régule les températures, façonne les paysages par l'érosion et relie les différentes régions de la planète à travers son cycle permanent. Elle constitue le milieu dans lequel se déroulent les réactions chimiques essentielles à la vie. Nous sommes nous-mêmes constitués d'environ 60 % d'eau, et c'est notamment à partir de l'eau des océans que le phytoplancton produit, par photosynthèse, une part considérable de l'oxygène que nous respirons.

Nous vivons au sein de ces milieux sans les percevoir directement.

À l'échelle cosmique, la situation pourrait être comparable.

La **matière noire** et l'**énergie sombre**, bien qu'invisibles, semblent jouer un rôle majeur dans la structure et l'évolution de l'Univers. Là encore, ce qui échappe à nos sens pourrait contribuer à organiser ce que nous percevons.

Une première analogie apparaît : les structures visibles dépendent souvent de « milieux » invisibles qui les relient, les influencent ou les rendent possibles.

C'est avec ce regard que nous allons poursuivre nos analogies entre la physique, la nature et le vivant.

Une analogie cosmique : le système solaire comme un atome

Lorsque l'on compare les grandes structures de l'Univers avec celles de la matière, les systèmes qui les composent présentent-ils des ressemblances qui dépassent la simple coïncidence ?

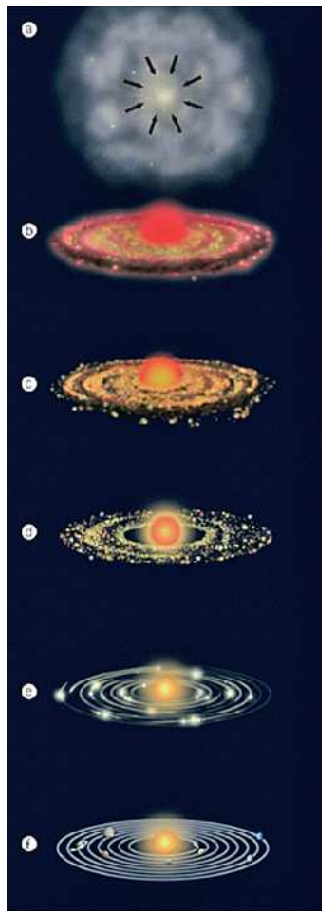
Face à l'immensité de l'univers et à l'énigme de ses composantes invisibles, il peut sembler que tout nous échappe. Mais, en observant de plus près notre environnement cosmique immédiat, nous disposons d'un exemple précieux : notre propre Système solaire.

Sa formation, sa structure et son évolution offrent un aperçu concret des mécanismes qui

façonnent les systèmes planétaires à travers l'Univers. Étudier la naissance et la dynamique du Système solaire, c'est déjà mieux comprendre la manière dont la matière visible peut s'organiser sous l'effet des lois de la physique.

Le Système solaire est né, il y a environ 4,6 milliards d'années, à partir d'un immense nuage de gaz et de poussières : la nébuleuse primitive. Sous l'effet de la gravitation, une partie de ce nuage s'est effondrée sur elle-même, entraînant une concentration croissante de matière en son centre. La température et la pression y ont progressivement augmenté jusqu'à permettre le déclenchement des réactions de fusion nucléaire : le Soleil venait de naître.

Autour de lui, la matière restante s'est progressivement aplatie en un vaste disque en rotation. Dans ce disque protoplanétaire, les grains de poussière se sont assemblés, puis des corps de plus en plus importants se sont formés, jusqu'à donner naissance aux planètes, tandis que d'autres matériaux allaient constituer astéroïdes, comètes et petits corps.



Formation du Système solaire : du nuage de gaz et de poussières à un ensemble organisé autour du Soleil.

Ce processus d'accrétion, gouverné par les lois fondamentales de la physique - gravitation, conservation du moment cinétique, interactions électromagnétiques - illustre la capacité remarquable de la matière à s'organiser spontanément, à passer du chaos apparent à une forme d'ordre organisé et dynamique.

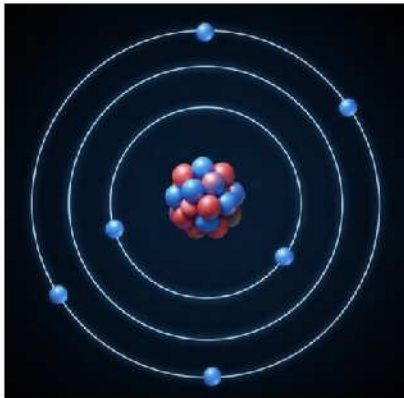
Ainsi prit forme notre Système solaire : une étoile au cœur d'un ensemble en équilibre dynamique, où chaque planète suit sa propre trajectoire tout en appartenant à un même système. Ce principe général d'organisation - une étoile entourée de matière issue d'un disque en rotation - se retrouve, avec d'immenses variations, dans de nombreux systèmes planétaires de l'Univers.

Or, cette architecture - un centre dominant, des corps qui l'entourent, un équilibre mouvant entre attraction et mouvement - n'est pas sans rappeler une autre représentation fondamentale de la nature : celle de l'atome.

En 1913, le physicien danois Niels Bohr proposa une représentation de l'atome : un noyau central autour duquel les électrons occupaient des orbites déterminées, rappelant l'organisation des planètes autour du Soleil. Cette image, révolutionnaire pour son époque, demeure profondément ancrée dans notre représentation de l'atome, *même si la mécanique quantique a depuis montré qu'elle ne correspond pas à sa véritable structure.*

Atome et Système solaire : des architectures comparables

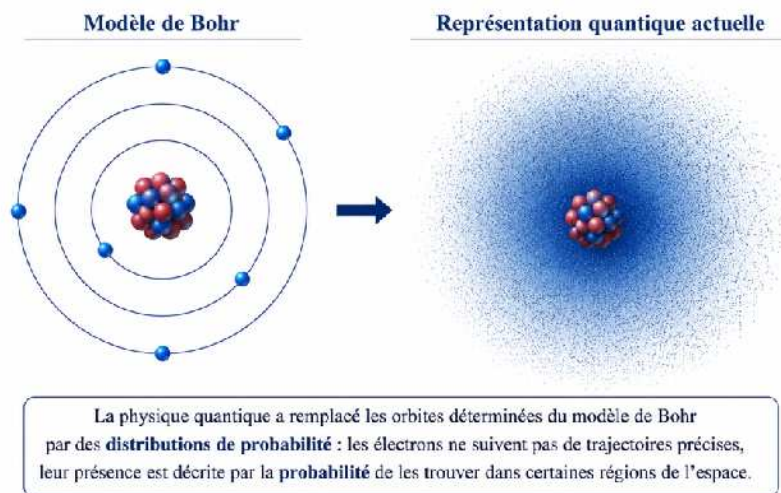
Modèle de Bohr : noyau entouré d'électrons sur des orbites déterminées.



Système solaire : étoile entourée de planètes sur leurs orbites.



De l'atome de Bohr à l'atome quantique



La ressemblance n'en demeure pas moins frappante. Dans les deux représentations, nous retrouvons un centre autour duquel s'organisent d'autres éléments, maintenus dans un ensemble cohérent par des interactions qui agissent à distance.

Mais un autre point me paraît plus intéressant encore : **ce ne sont pas seulement les éléments qui constituent le système, ce sont aussi les relations qui les unissent.**

L'orbite d'une planète n'est pas une propriété qu'elle possède isolément : elle résulte de sa relation gravitationnelle avec l'étoile autour de laquelle elle évolue, tout en étant influencée, plus faiblement, par les autres corps du Système solaire.

De la même manière, un atome ne se réduit pas à l'addition d'un noyau et d'électrons. Sa structure dépend des interactions entre ses constituants et des lois quantiques qui déterminent les états qu'ils peuvent occuper.

Dans les deux cas, l'organisation n'est donc pas contenue dans les éléments pris séparément. Elle apparaît dans les relations qu'ils entretiennent.

C'est précisément cette idée qui revient depuis plusieurs chapitres : **l'information permet l'existence, l'organisation permet l'émergence, la relation permet l'évolution.**

Un système n'est pas seulement une collection d'éléments. Il est aussi l'ensemble des relations qui les organisent et leur permettent de former un tout.

Les différences entre les deux systèmes sont pourtant considérables.

Dans le Système solaire, les planètes suivent des trajectoires que la gravitation permet de calculer avec une grande précision.

Dans l'atome, les électrons ne sont pas de petites planètes parcourant des orbites déterminées autour du noyau, comme le pensait Bohr. Leur comportement est quantique et se décrit en termes d'états et de probabilités.

Les interactions elles-mêmes sont différentes : la gravitation domine l'organisation du Système solaire, tandis que l'interaction électromagnétique joue un rôle essentiel dans la structure de l'atome.

Peut-être faut-il alors chercher la ressemblance non dans les forces elles-mêmes, mais dans **les formes d'organisation qu'elles rendent possibles**. Dans les deux cas, nous retrouvons un centre, des éléments qui s'organisent autour de lui, des interactions qui les relient et, de ces relations, un ensemble organisé.

L'image serait celle d'une même forme générale d'organisation, adaptée à chaque échelle : les dimensions, les forces et les comportements changent, tandis que l'organisation demeure.

Les éléments seuls ne suffisent pas à définir un système. Ce sont aussi les relations entre eux qui lui donnent sa cohérence.

Et si ce même principe d'organisation se retrouvait à toutes les échelles de l'Univers ?

Les atomes constituent les briques fondamentales de la matière. Les systèmes planétaires pourraient-ils alors jouer, à une tout autre échelle, un rôle comparable ?

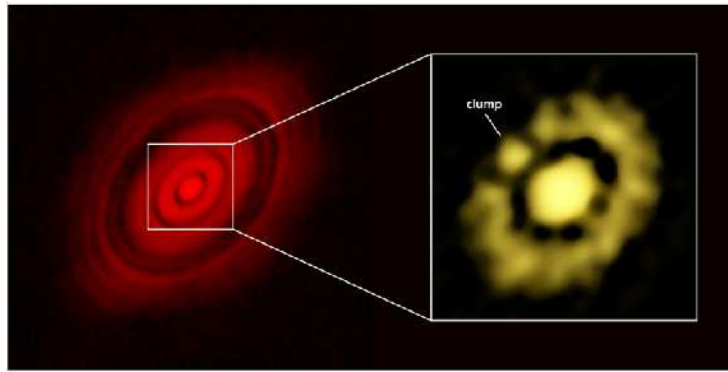
Comme dans un atome, chaque composant du **Système solaire** est indissociable des relations qu'il entretient avec l'ensemble.

Planète en formation : des structures imbriquées

Passons à la formation d'une **planète** en cours d'accrétion.

Autour d'une jeune étoile s'étend donc un vaste disque de gaz et de poussières au sein duquel les planètes se forment.

*Ce jeune système solaire comme **HL Tauri** permet de voir ces vastes disques protoplanétaires, parcourus d'anneaux et de sillons où la matière s'organise progressivement.*

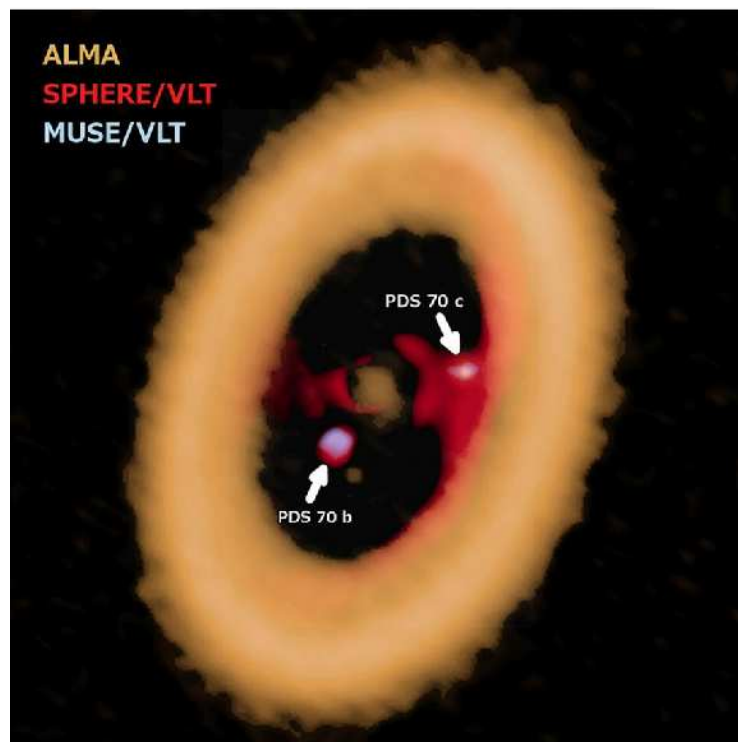


À gauche, un vaste disque de gaz et de poussières autour d'une jeune étoile, au sein duquel des planètes peuvent se former.

À droite, l'agrandissement d'une région d'un disque montre une concentration de matière (clump = amas), première étape vers la formation d'une planète.

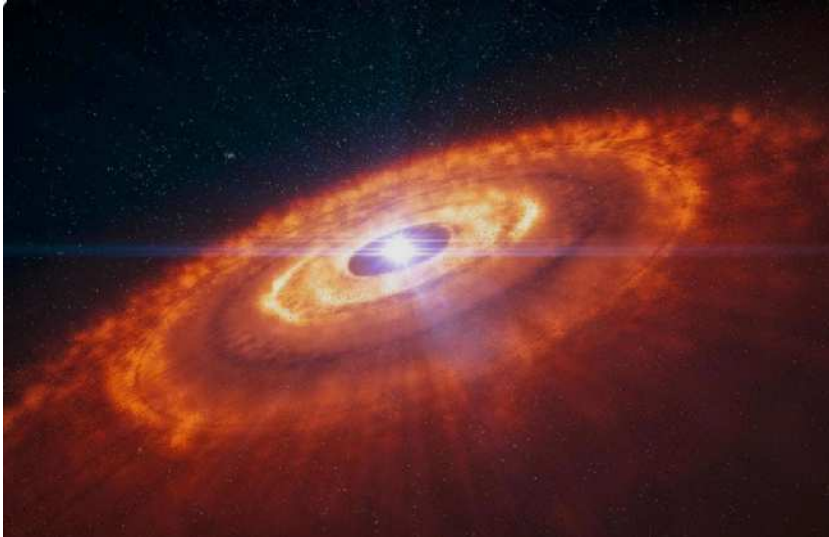
Mais certaines de ces planètes peuvent à leur tour être entourées de leur propre disque de matière, appelé disque circumplanétaire, à partir duquel pourra se former leurs satellites, leurs lunes.

***Cet autre système PDS 70** : autour de cette jeune étoile se forment au moins deux planètes géantes, PDS 70b et PDS 70c. Autour de cette dernière, on distingue un disque circumplanétaire à partir duquel pourraient se former des lunes.*

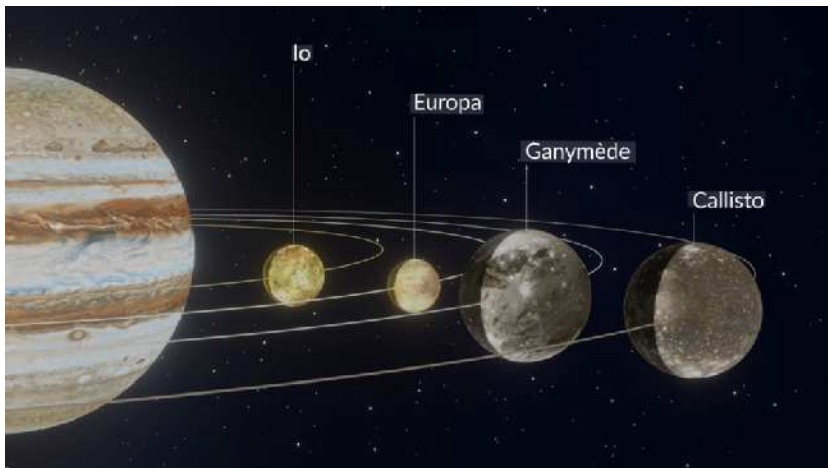


Nous découvrons ainsi une organisation emboîtée. Des systèmes dans les systèmes, des mouvements orbitaux à l'intérieur d'autres ensembles en mouvement. La nature semble ici reprendre une organisation comparable, à des échelles différentes, chaque niveau possédant pourtant ses propres dimensions et ses propres conditions.

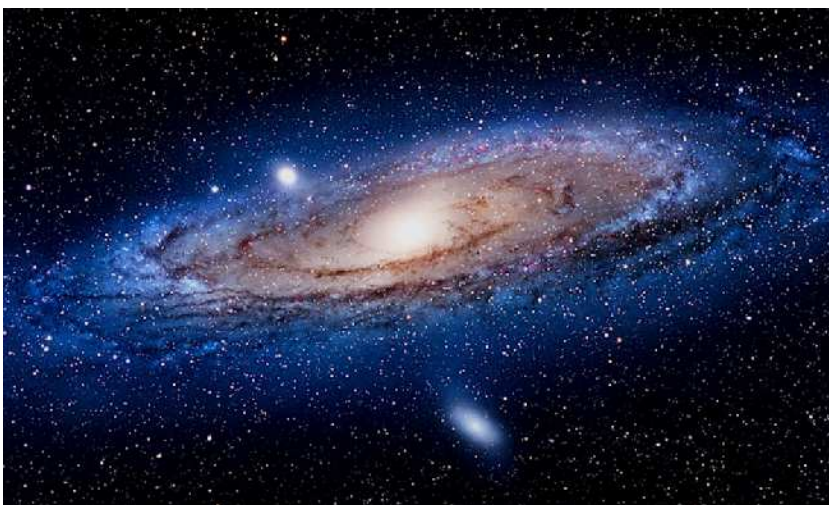
Système solaire : l'étoile entourée de ses planètes



Système planétaire : Jupiter entourée de ses lunes



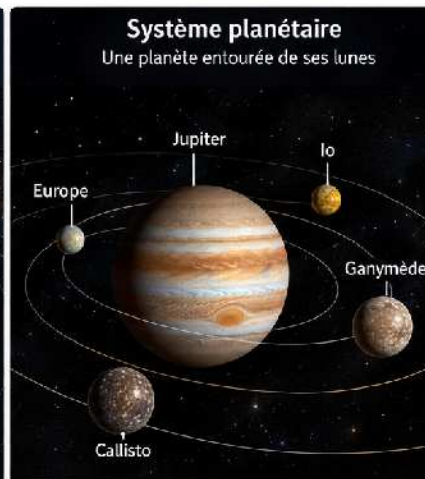
Galaxie : une structure organisée autour d'une région centrale, abritant un trou noir supermassif



Des structures comparables, à des échelles différentes



Le Système solaire est organisé autour du Soleil. Les planètes, les astéroïdes, les comètes et d'autres corps y gravitent, chacun suivant sa propre trajectoire tout en étant lié aux autres par la gravitation.



Autour de certaines planètes, comme Jupiter, des lunes gravitent à leur tour. Elles sont liées à la planète par la gravitation et constituent un système à plus petite échelle.



Dans une galaxie, des centaines de milliards d'étoiles, de gaz et de poussières forment un ensemble organisé. Leur mouvement résulte de l'attraction gravitationnelle de toute la matière présente, avec une concentration plus importante dans la région centrale.

Dans chaque cas, nous retrouvons une organisation générale : un centre ou une région centrale, des éléments qui s'organisent autour de lui, et des interactions qui participent à la cohérence de l'ensemble. Les dimensions, les forces et les comportements changent, mais une même forme d'organisation se retrouve à toutes les échelles.

Et ces structures ne sont pas seulement comparables, elles s'emboîtent.

Les atomes constituent la matière des planètes. Les planètes et leurs lunes forment un système de satellites. Ces planètes appartiennent elles-mêmes à des systèmes planétaires organisés autour d'une étoile. Et ces systèmes s'inscrivent à leur tour dans des galaxies, qui appartiennent elles-mêmes à des ensembles encore plus vastes.

Du minuscule à l'immense se dessine ainsi une même logique d'organisation en niveaux successifs et emboîtés, comme des poupées russes cosmiques, sans que les mécanismes physiques qui régissent chacun de ces niveaux soient nécessairement les mêmes.

Est-ce seulement une forme que notre regard reconnaît facilement ?

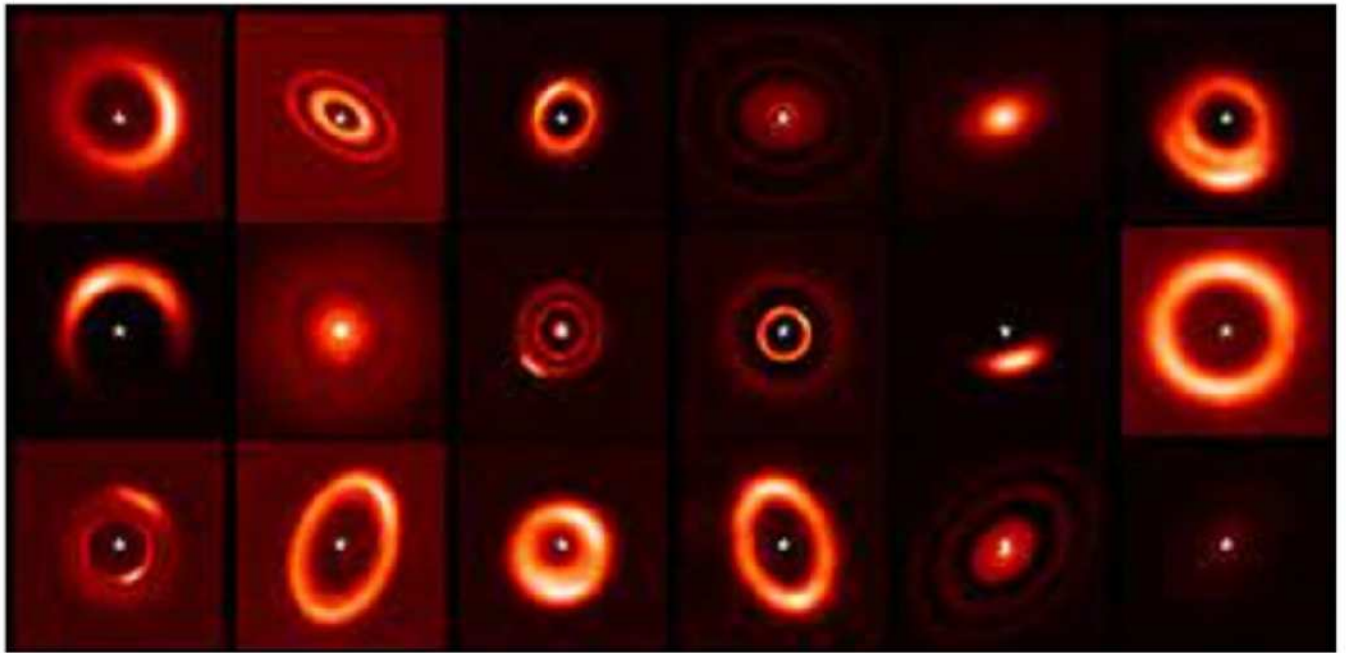
Ou cette organisation constitue-t-elle elle-même une caractéristique profonde de la nature ?



Les variantes d'un même principe

Les observations de jeunes étoiles révèlent une diversité de disques protoplanétaires. Certains présentent de vastes anneaux, d'autres des sillons, des zones plus denses ou des structures irrégulières.

Tous ne suivent donc pas un modèle unique. Pourtant, derrière cette diversité, nous retrouvons une même organisation générale : **une étoile centrale, entourée d'un disque de matière au sein duquel de nouvelles structures peuvent apparaître.**



Ces observations montrent ainsi que **l'organisation n'implique pas l'uniformité**. Un même principe général peut donner naissance à des formes très différentes.

Il en va d'ailleurs de même dans tout le vivant : au sein d'une même espèce, chaque individu est unique, bien que tous partagent une même organisation fondamentale.



Ces images nous rappellent également autre chose : **l'Univers n'est pas achevé.** Plus de 13 milliards d'années après sa naissance, de nouvelles étoiles et de nouveaux systèmes planétaires continuent de se former. La matière continue de se rassembler, d'interagir, de s'organiser et de donner naissance à de nouvelles structures.

Ce que nous observons dans le ciel n'est donc pas seulement le résultat d'une histoire passée. **Nous assistons encore aujourd'hui à cette histoire en train de s'écrire.**

Un élément peut transformer tout un système

L'hydrogène est l'atome qui a la structure la plus simple :

un noyau constitué d'un proton et un seul électron.

Il est aussi l'un des deux atomes primordiaux apparus dans l'Univers après le Bing bang.

Mais cette simplicité ne doit pas tromper. L'hydrogène constitue encore aujourd'hui l'élément le plus abondant de l'Univers. C'est à partir de vastes concentrations de matière dominées par l'hydrogène que se forment les étoiles, au cœur desquelles la fusion nucléaire produira progressivement des éléments plus lourds.

Ainsi, l'un des systèmes atomiques les plus simples se trouve à l'origine d'une grande partie de la complexité qui apparaîtra ensuite dans l'Univers.

À une tout autre échelle, notre planète offre un autre exemple intéressant.

La Terre ne possède qu'un seul grand satellite naturel : la Lune.

Pourtant, sa présence a profondément participé à l'histoire et à la dynamique de notre planète. Elle est loin d'être accessoire.

La Terre vue de la lune



La Terre constitue aujourd'hui **le monde le plus complexe que nous connaissons**, le seul sur lequel nous sachions avec certitude que la matière a donné naissance à la vie, à des écosystèmes d'une extraordinaire diversité et, finalement, à des êtres capables d'observer l'Univers dont ils sont issus.

Bien entendu, cette complexité ne peut être attribuée uniquement à la Lune. Mais notre unique satellite a participé à certaines des conditions dans lesquelles cette histoire s'est déroulée.

Par son attraction gravitationnelle, **la Lune joue un rôle majeur dans les marées. Elle contribue également à limiter les variations de l'inclinaison de l'axe terrestre sur de très longues périodes.**

Mais son influence ne s'arrête pas là. **Les marées** qu'elle provoque et **les variations régulières de sa lumière** constituent des repères auxquels de nombreuses espèces ont adapté certains moments essentiels de leur existence, notamment leur reproduction.

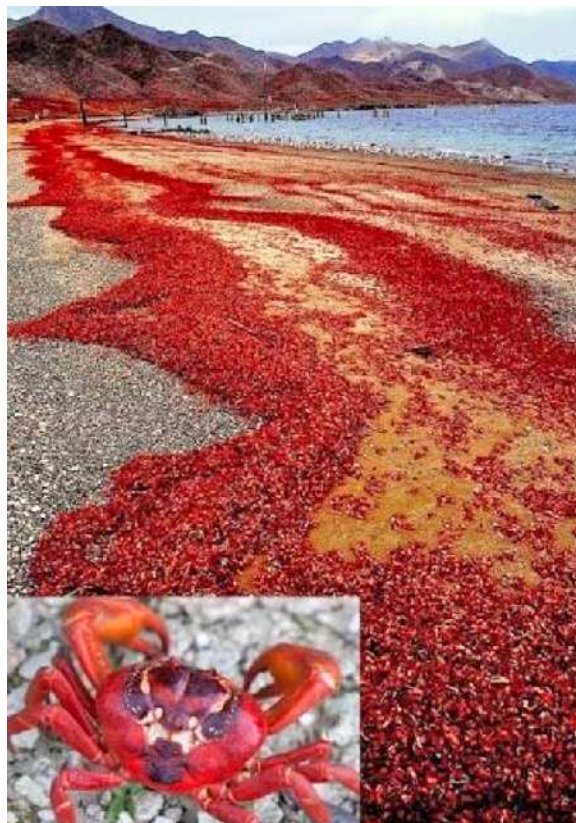
Le phénomène est particulièrement spectaculaire chez **les coraux**. Dans les grands récifs coralliens du monde, de nombreuses espèces synchronisent leur reproduction avec les cycles lunaires. À **une période précise de l'année**, quelques heures après le coucher du soleil et dans la nuit qui suit la **pleine lune**, d'immenses colonies libèrent simultanément leurs gamètes dans l'eau. Des milliards d'ovules et de spermatozoïdes forment alors de véritables nuages au-dessus des récifs, parfois jusqu'à couvrir la surface de la mer. Cette extraordinaire synchronisation, **une fois par an**, augmente considérablement leurs chances de fécondation.



Lors de ce phénomène appelée « la ponte synchronisée », des milliards de gamètes sont libérés presque simultanément par les coraux, formant de véritables nuages au-dessus du récif.

Sur l'île Christmas, le phénomène prend une autre forme, tout aussi spectaculaire. Une fois par an, avec l'arrivée des premières pluies, **des dizaines de millions de crabes rouges** quittent la forêt tropicale et parcourent parfois plusieurs kilomètres pour rejoindre la côte. Les

mâles arrivent généralement les premiers, creusent des terriers où a lieu l'accouplement, puis repartent après, vers l'intérieur de l'île. Les femelles restent près du rivage pour incuber leurs œufs. C'est alors que **le cycle lunaire intervient de manière décisive : elles libèrent leurs œufs dans l'océan, à l'aube, au moment du reflux de la marée haute, et ce spécifiquement durant la phase de dernier quartier de Lune !** Le déplacement est d'une telle ampleur que des routes sont temporairement fermées et des ponts et tunnels spécialement aménagés permettent aux crabes de traverser l'île sans être écrasés.



La spectaculaire migration annuelle des crabes rouges de l'île Christmas.

Mais les animaux sont-ils les seuls à être sensibles à ces rythmes lunaires ?

La question se pose également pour les végétaux. Depuis longtemps, certaines pratiques agricoles et forestières tiennent compte des phases de la Lune.

L'ingénieur forestier suisse Ernst Zürcher étudie depuis de nombreuses années les rythmes biologiques des arbres. Il a choisi de soumettre ces traditions à l'expérimentation scientifique.



En 1998, il publie avec ses collègues, dans la revue *Nature*, une étude montrant que le diamètre des troncs d'arbres subit de minuscules variations rythmiques, même lorsque la lumière, la température et l'humidité sont contrôlées. Ces fluctuations présentent une corrélation avec les cycles des marées gravitationnelles, suggérant une influence de la Lune sur les mouvements de l'eau à l'intérieur des arbres.

Ses recherches ont également porté sur la germination des graines. Une analyse publiée en 2014 a mis en évidence, chez l'épicéa, de légères différences de germination selon le moment du cycle lunaire auquel les graines avaient été semées.

Les arbres pourraient-ils donc être sensibles, eux aussi, à des rythmes lunaires que nous ne percevons pas ?

Une autre étude, publiée en 2025, a révélé un phénomène étonnant. Des épicéas équipés d'électrodes ont montré **une modification et une synchronisation de leur activité bioélectrique plusieurs heures avant une éclipse solaire**, particulièrement marquées chez les arbres les plus âgés. Autrement dit, le phénomène aurait commencé **avant même que la diminution de la lumière provoquée par l'éclipse ne puisse en être la cause**.

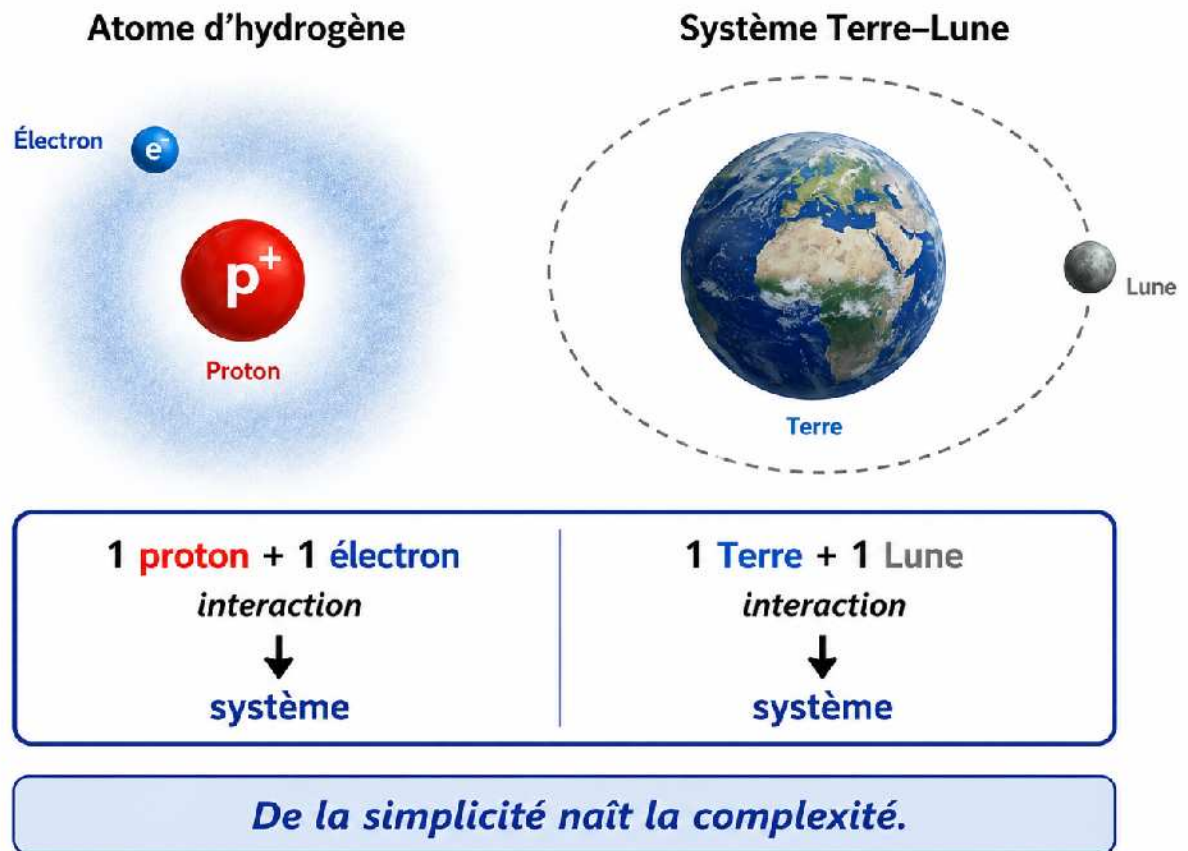
Comment l'expliquer ? Les chercheurs envisagent notamment une possible sensibilité à des variations liées aux positions relatives de la Terre, de la Lune et du Soleil. L'étude a suscité des critiques et son interprétation devra être confirmée par d'autres observations. Mais la question qu'elle soulève demeure : les végétaux pourraient-ils être sensibles à certains rythmes astronomiques ?

Un seul élément peut donc modifier profondément le comportement et l'évolution de l'ensemble auquel il appartient.

La Terre ne serait pas exactement la même Terre sans la Lune, non parce que celle-ci en constitue une partie, mais parce que leur relation fait elle-même partie de l'histoire et de la dynamique de notre planète.

Et c'est peut-être ici que la comparaison avec l'hydrogène retrouve son véritable sens.

**D'un côté, un proton et un électron dont la relation forme un atome d'hydrogène.
De l'autre, une Terre et une Lune dont la relation a profondément influencé l'histoire de notre planète.**



Les forces, les dimensions et les mécanismes n'ont rien d'identique. **Ce n'est donc pas leur mouvement que nous cherchons à comparer, mais ce que la relation entre leurs constituants permet de faire apparaître.**

La complexité ne nécessite pas nécessairement des constituants complexes au départ. Des éléments relativement simples, par leurs interactions, leur organisation et l'histoire de leurs relations, peuvent participer à l'émergence de structures d'une complexité croissante.

L'espace fait aussi partie de la structure

Un atome est étonnamment peu « rempli » de matière. **Si un atome avait la taille d'un terrain de football, son noyau serait à peine plus grand qu'un pois chiche, tandis que les électrons seraient comparables à de minuscules grains de poussière.**

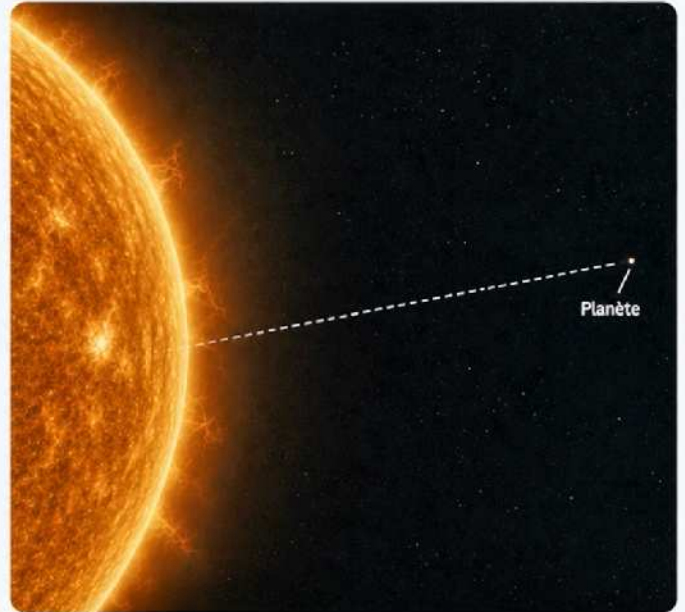
L'image est volontairement simplifiée, mais elle permet de saisir l'essentiel : à l'échelle de l'atome, la matière occupe une part infime de l'espace que nous lui attribuons.

Ce que nous observons à l'échelle de l'atome se retrouve également dans les systèmes astronomiques : des distances immenses séparent leurs constituants.

Si un atome avait la taille d'un terrain de football, son **noyau** serait à peine plus grand qu'un pois chiche, tandis que les **électrons** seraient comparables à de minuscules grains de poussière.



À une tout autre échelle, les systèmes astronomiques présentent eux aussi d'immenses distances entre leurs constituants. Entre une étoile et ses planètes, puis entre les étoiles d'une galaxie, les objets eux-mêmes n'occupent qu'une infime partie de l'espace dans lequel le système s'organise.



Ce qui frappe dans cette comparaison, c'est l'immensité de l'espace qui sépare les constituants de ces deux systèmes, proportionnellement à leurs dimensions.

À l'échelle de l'atome comme à celle des systèmes astronomiques, la matière semble n'occuper qu'une infime partie de l'espace dans lequel elle s'organise.

Pourquoi une telle disproportion ? Est-ce une simple coïncidence, ou retrouvons-nous ici une autre similitude dans l'organisation de la matière, du minuscule à l'immense ?

Les forces qui interviennent sont pourtant très différentes. Dans l'atome, c'est l'interaction électromagnétique qui lie les électrons au noyau. Dans les systèmes astronomiques, c'est principalement la gravitation qui organise les mouvements des corps célestes.

Mais dans les deux cas, les interactions s'exercent à travers cet espace apparemment vide.

L'espace qui les sépare n'interrompt pas nécessairement la relation. Il fait lui-même partie de l'architecture du système.

Et si cet espace n'était pas simplement ce qui sépare les éléments, mais aussi ce qui permet à un système d'exister et de s'organiser ?

Ce « vide », si présent à toutes ces échelles, pourrait-il être aussi essentiel à la structure de l'Univers que la matière elle-même ?

Une harmonie du mouvement

Les images que nous utilisons pour représenter ces systèmes peuvent également être trompeuses. Pour les comprendre, nous dessinons des cercles, des orbites ou des plans. Mais la réalité se déploie dans trois dimensions — et, surtout, elle est dynamique.

Le mouvement semble en effet inséparable de la matière et des systèmes qu'elle forme.

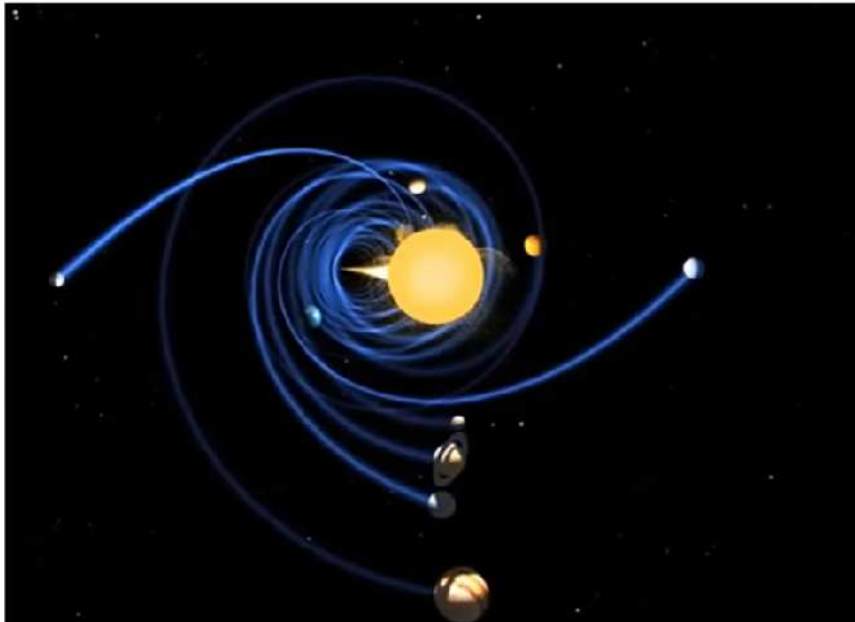
Il est déjà présent au cœur de l'atome. Celui-ci n'est pas un assemblage figé de particules. Il serait faux d'imaginer les électrons comme de petites planètes parcourant des orbites déterminées autour du noyau, mais cela ne signifie pas qu'ils soient immobiles. La mécanique quantique les décrit par des états auxquels sont associées une énergie, une quantité de mouvement et une certaine distribution de probabilité dans l'espace. Ils peuvent également passer d'un état énergétique à un autre en absorbant ou en émettant de l'énergie.

Le noyau lui-même est un système dynamique. Protons et neutrons y sont liés par l'interaction nucléaire forte et possèdent eux aussi une dynamique quantique. Et à une autre échelle encore, les atomes vibrent, se déplacent, entrent en collision et interagissent continuellement avec ceux qui les entourent. Même dans un solide qui nous paraît parfaitement immobile, les atomes vibrent autour de leurs positions d'équilibre.

Ainsi, à l'échelle microscopique déjà, l'immobilité apparente de la matière dissimule une activité permanente.

À l'échelle astronomique, ces mouvements deviennent plus faciles à se représenter - et leur vitesse donnent le vertige. La Terre tourne sur elle-même tout en parcourant son orbite autour du Soleil. La Lune accompagne la Terre dans ce voyage tout en accomplissant son propre mouvement autour du système Terre-Lune. Le Soleil entraîne avec lui l'ensemble de son système planétaire dans sa course autour du centre de la Voie lactée. Et notre Galaxie elle-même est en mouvement.

À l'équateur, la rotation de la Terre nous entraîne à environ **1 670 km/h**. Notre planète parcourt son orbite autour du Soleil à près de **107 000 km/h**, tandis que le Système solaire se déplace autour du centre de la Voie lactée à environ **800 000 km/h**.

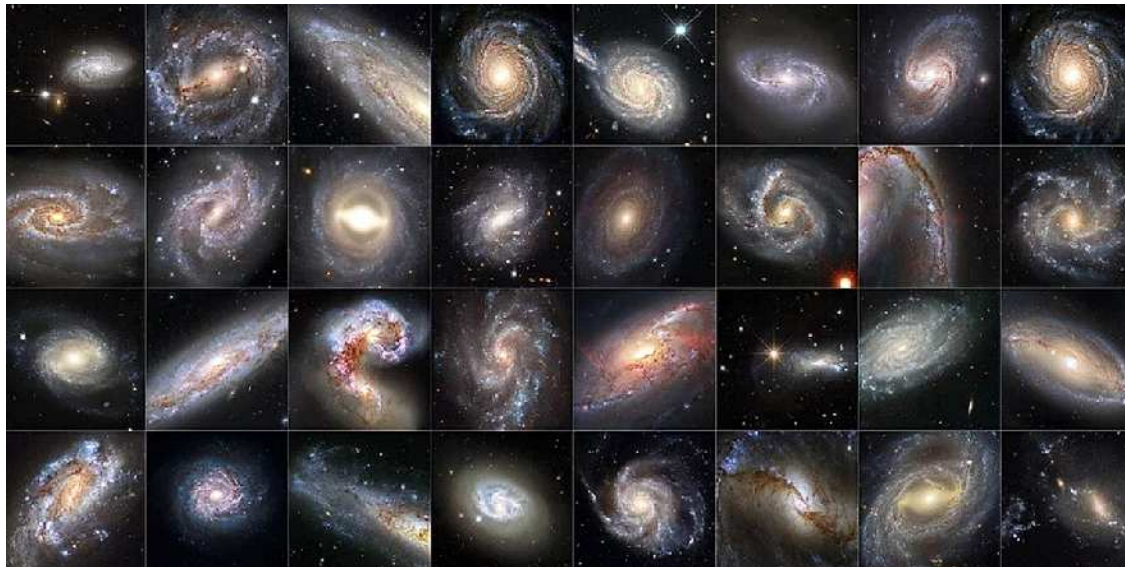


Nous sommes donc, à chaque instant, emportés simultanément dans plusieurs mouvements.

Et les mouvements semblent s'emboîter comme les systèmes eux-mêmes. Une lune accompagne une planète ; la planète accompagne son étoile ; l'étoile appartient à une galaxie dont elle suit le mouvement tout en se déplaçant en son sein.

Lorsqu'on représente ces trajectoires dans l'espace et dans le temps plutôt que sur une feuille immobile, elles deviennent beaucoup plus complexes. Un corps tourne autour d'un autre qui est lui-même en mouvement ; certaines trajectoires peuvent alors prendre des formes hélicoïdales ou évoquer des spirales.

Et justement, la spirale, le tourbillon, le vortex semblent réapparaître avec une étonnante fréquence dans la nature. Les galaxies spirales en offrent l'une des manifestations les plus spectaculaires ; mais nous retrouverons ces formes dans les mouvements des fluides, dans l'atmosphère, dans l'eau et, comme nous le verrons plus loin, jusque dans certains phénomènes d'organisation du vivant.



Ces formes ne sont évidemment pas produites partout par les mêmes forces ni par les mêmes mécanismes. Mais leur réapparition à des échelles et dans des systèmes aussi différents mérite d'être remarquée : **pourquoi la rotation, la spirale et le vortex occupent-ils une place aussi importante dans les formes et les mouvements de la nature ?**

Ce que nous appelons « stabilité » ne signifie donc pas immobilité. Une organisation peut persister pendant des durées considérables, alors même que ses constituants bougent, échangent de l'énergie et changent continuellement de position ou d'état.

Le mouvement n'est peut-être donc pas simplement quelque chose que l'organisation supporte. Il ferait partie aussi de l'organisation elle-même.

De l'atome aux systèmes astronomiques, nous avons ainsi découvert d'étonnantes ressemblances : des architectures comparables, des structures imbriquées les unes dans les autres, des principes d'organisation qui se retrouvent malgré une extraordinaire diversité.

Nous avons également observé qu'un seul élément peut influencer profondément l'ensemble auquel il appartient, que l'espace séparant les constituants fait lui-même partie de la structure et que le mouvement participe à son organisation.

Pourquoi retrouvons-nous autant de similitudes à des échelles aussi différentes ? S'agit-il de simples ressemblances ou de l'expression de principes d'organisation plus fondamentaux ?

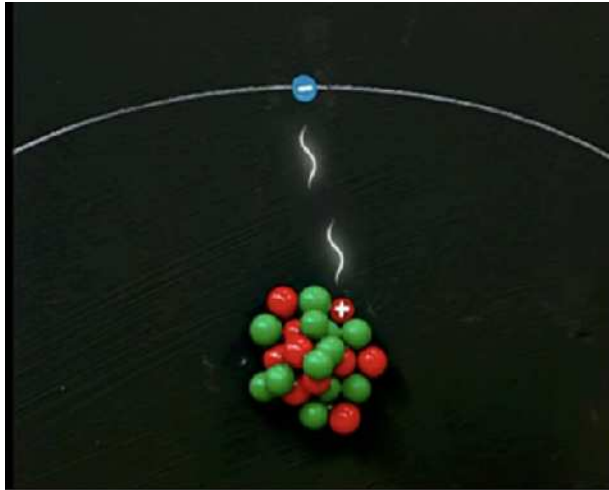
Une même interaction, des rôles différents

Une autre comparaison mérite notre attention : **l'électromagnétisme**, qui intervient aussi bien dans l'organisation de l'atome que dans les relations entre le Soleil et les planètes.

À l'échelle de l'atome, l'interaction **électromagnétique** relie le noyau aux électrons.

À l'échelle du Système solaire, le rayonnement **électromagnétique** transmet l'énergie du Soleil aux planètes.

Atome



Système solaire



Le rôle n'est pas le même. Dans le premier cas, l'électromagnétisme assure la liaison entre le noyau et les électrons. Dans le second, il transporte l'énergie solaire à travers l'espace.

Sur Terre, cette seconde relation est fondamentale. L'énergie reçue du Soleil participe au climat, au cycle de l'eau et, par la photosynthèse, alimente l'immense majorité du vivant.

Sans le noyau, pas d'atome.

Sans le Soleil, la Terre ne serait pas la Terre.

Ce rapprochement révèle quelque chose d'intéressant : une même interaction fondamentale, l'électromagnétisme, peut jouer des rôles différents dans l'organisation et le fonctionnement de systèmes aussi éloignés que l'atome et le Système solaire.

Les aurores polaires nous offrent une manifestation spectaculaire de cette relation entre le Soleil et les planètes.

Le Soleil émet en permanence un flux de particules chargées, appelé **vent solaire**. Lorsque celui-ci interagit avec l'environnement magnétique de la Terre, il peut provoquer, jusque dans notre atmosphère, ces extraordinaires voiles lumineux que nous appelons aurores boréales ou australes.

Aurore boréale sur Terre :

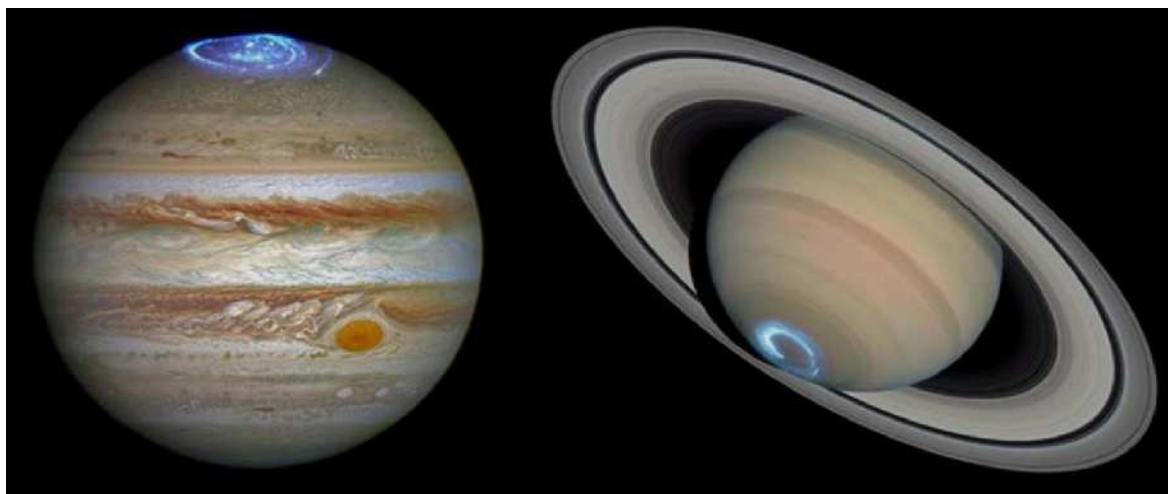
<https://www.youtube.com/shorts/QK1-c9UIVV8>



Et ce phénomène n'est pas propre à notre planète. **Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune possèdent également des aurores**, parfois bien plus intenses que les nôtres.

Aurore boréale sur : Jupiter

Saturne



Ainsi, à des centaines de millions, voire des milliards de kilomètres, **le Soleil continue d'interagir avec les planètes qui l'entourent**. L'espace qui les sépare n'empêche donc nullement les échanges : il est traversé de particules, de champs et d'énergie qui les mettent en relation.

Des systèmes sans frontières précises

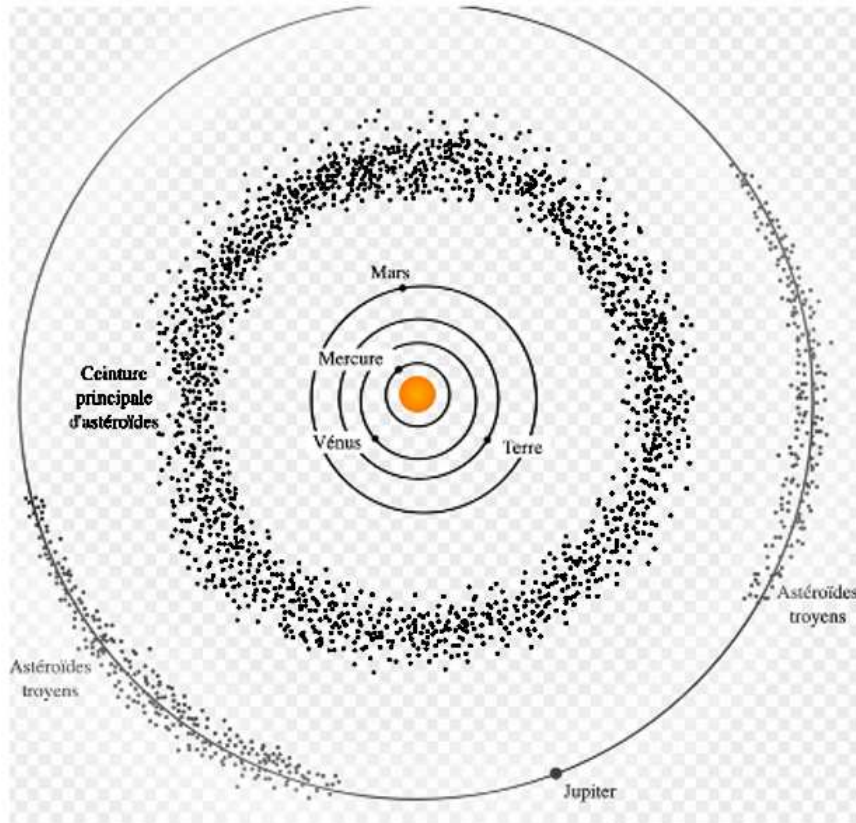
Une autre particularité mérite encore notre attention : **où se termine réellement un système ?**

Le Système solaire ne s'arrête pas à ses dernières planètes. Son organisation comprend aussi de vastes régions peuplées de petits corps :

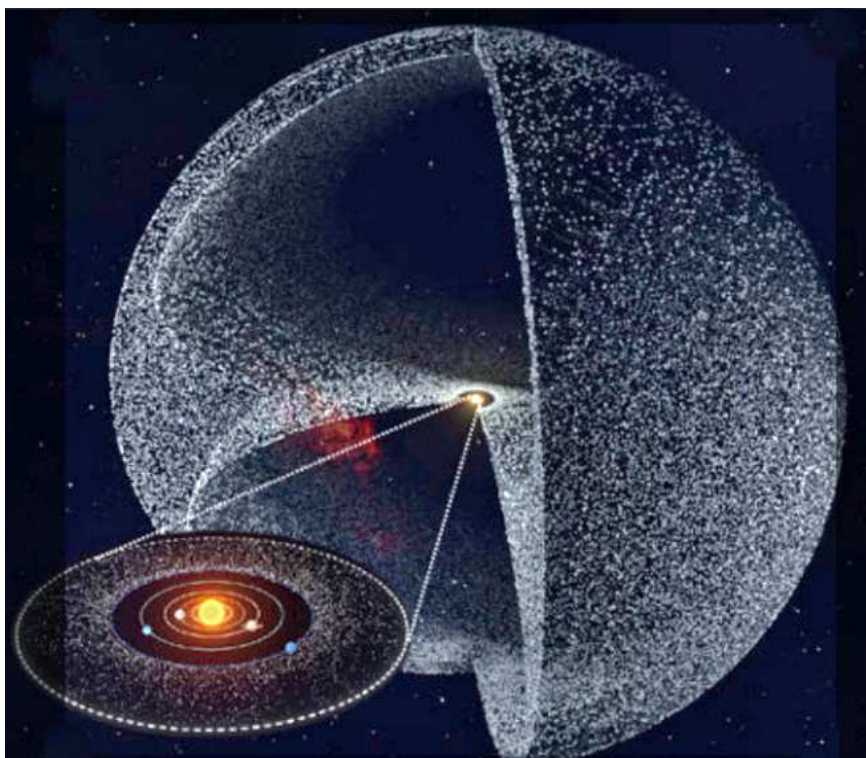
la ceinture principale d'astéroïdes, entre Mars et Jupiter,
puis, bien au-delà de Neptune, la ceinture de Kuiper.

Et beaucoup plus loin encore s'étendrait ce que les astronomes appellent le **nuage d'Oort**, une immense région de corps glacés encore liés gravitationnellement au Soleil.

Ceinture principale d'astéroïdes :



Ceinture de Kuiper dans le nuage d'Oort :



Le **Nuage d'Oort** est souvent représentée comme une vaste sphère entourant le Système solaire. **Elle n'est pourtant ni une coque ni une paroi : elle constituerait une périphérie diffuse, dont les limites elles-mêmes ne sont pas nettement définies.**

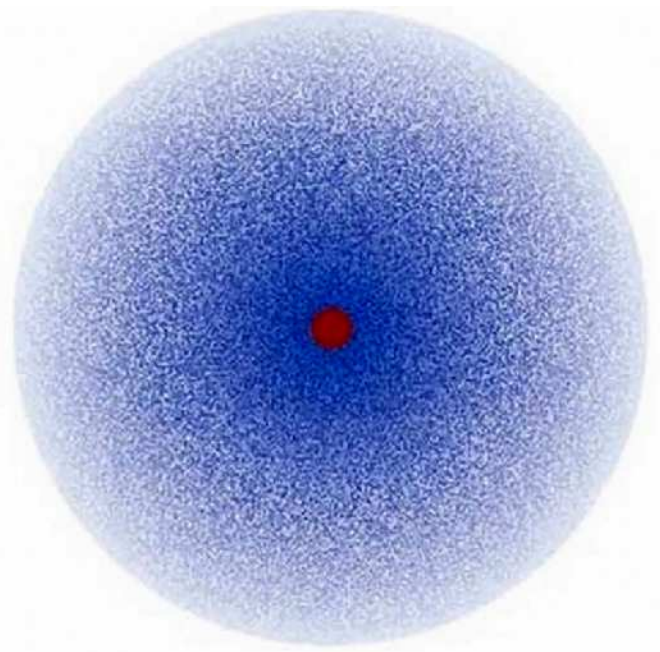
À une échelle incomparablement plus petite, l'atome présente visuellement une organisation qui peut rappeler celle-ci : un centre entouré d'une région périphérique qui appartient au système sans être enfermée par une enveloppe matérielle. Autour du noyau de l'atome d'hydrogène s'étend donc un nuage électronique.

Là encore, **il n'existe pas de frontière physique nette** : la probabilité de présence de l'électron diminue progressivement lorsqu'on s'éloigne du noyau. Le cercle que nous dessinons autour d'un atome n'est qu'une représentation de son extension.

Nuage de Oort :



Atome :



Dans les deux cas, nous pouvons identifier un système sans pouvoir tracer autour de lui une frontière matérielle précise.

Cette ressemblance soulève une question : **qu'est-ce qui définit réellement les limites d'un système ? Est-ce nécessairement une frontière visible, est-ce l'étendue des relations qui unissent ses constituants ?**

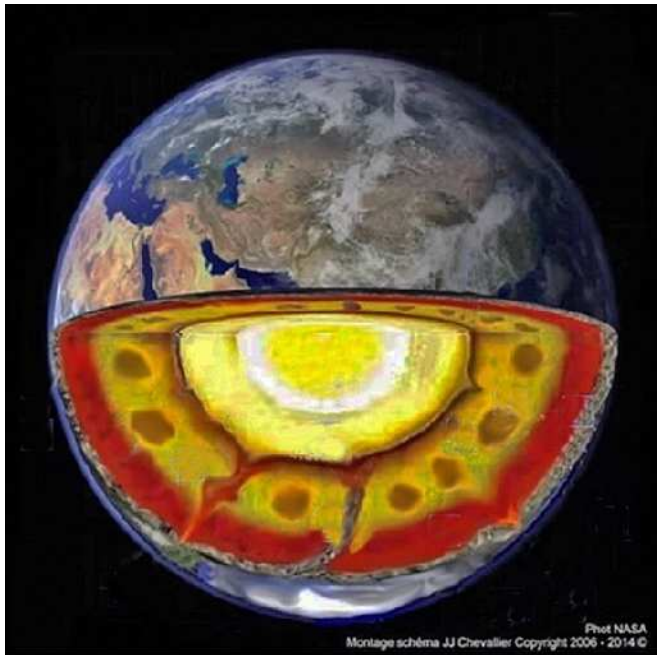
La Terre : une nouvelle forme de limite

Cette organisation autour d'un centre se retrouve sous une autre forme dans la structure même de notre planète.

La Terre possède un noyau, entouré de couches successives qui constituent son organisation interne.

Ici, cependant, les limites prennent une forme matérielle : différentes régions se distinguent par leur composition, leur état et leurs propriétés.

La Terre en coupe :



Ces couches ne constituent pas pour autant une architecture immobile. La matière et l'énergie y circulent, les différentes régions interagissent entre elles et la planète demeure un système profondément dynamique.

Nous découvrons ainsi une autre manière de délimiter et d'organiser un ensemble : **des régions distinctes, des couches successives et des frontières qui ne sont pas nécessairement des séparations absolues, puisque la matière et l'énergie peuvent circuler de l'une à l'autre.**

Qu'elles soient diffuses ou matériellement marquées, les limites d'un système ne sont donc pas toujours ce qui l'isole. Elles peuvent aussi participer à son organisation et aux échanges entre ses différentes parties.

Nous pourrions finalement en conclure que la Nature suit une même logique fondamentale d'organisation, qui se manifeste sous des formes différentes à toutes les échelles de l'Univers.

Quand la limite devient une membrane

Avec le vivant, quelque chose change.

La cellule possède une véritable frontière matérielle : **sa membrane.**

Elle distingue l'intérieur de la cellule de son environnement sans pour autant l'enfermer on plus.

Surtout, cette frontière n'est pas passive : **elle contrôle les échanges**, laisse passer certaines substances, en retient d'autres et contribue au maintien des conditions nécessaires au fonctionnement de la cellule.

Nous retrouvons donc une limite, mais d'une nature nouvelle.

Autour de l'atome ou aux confins du Système solaire, la limite était diffuse, sans paroi matérielle.

Avec la Terre, nous avons rencontré des limites matérielles entre différentes régions.

Avec la cellule, apparaît autre chose encore : une membrane active et sélective qui participe directement à la régulation du système.

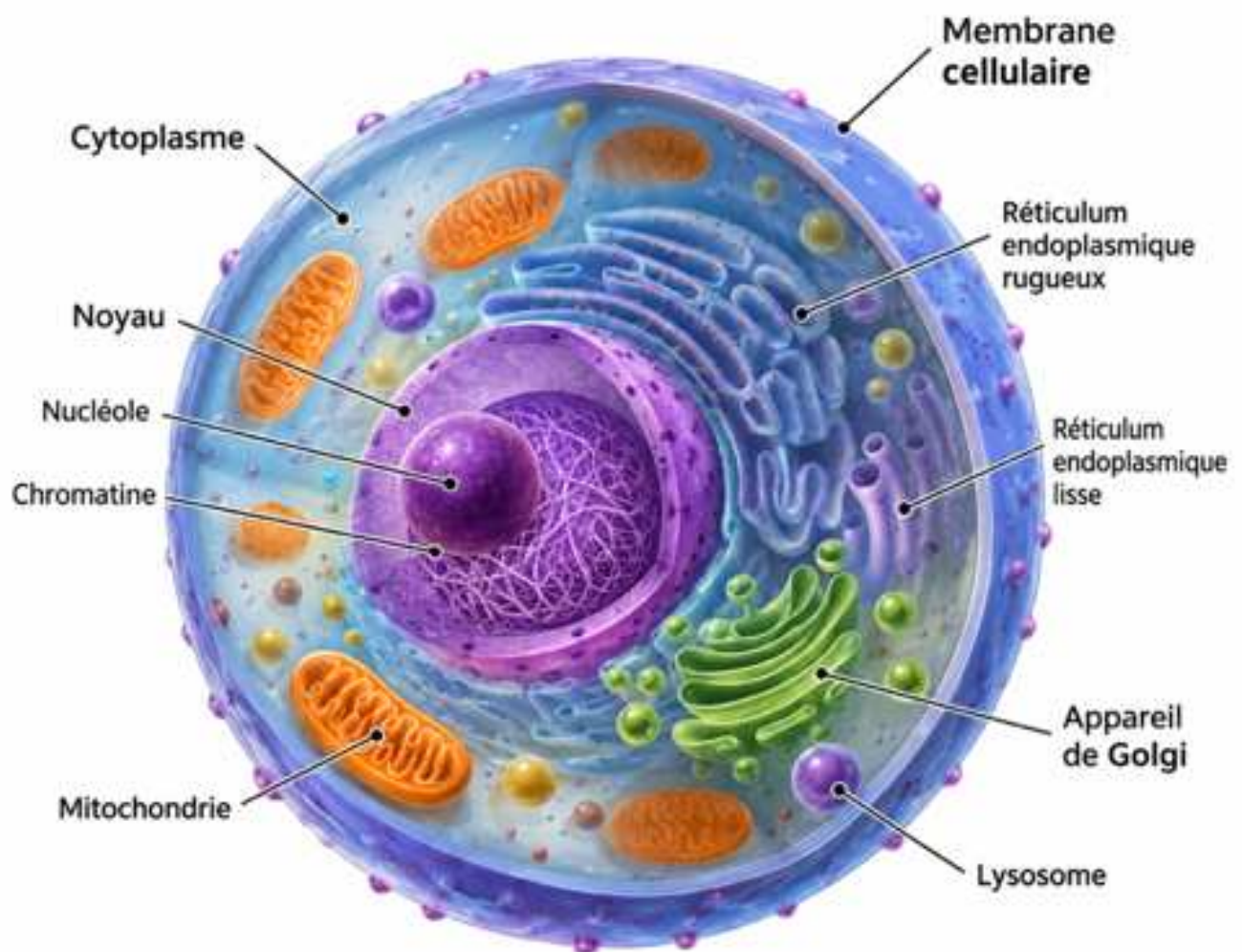
Le principe du centre en relation avec ce qui l'entoure demeure.

Mais une dimension supplémentaire apparaît : **l'organisation devient capable de maintenir activement un milieu intérieur distinct de son environnement sans s'en isoler.**

On peut alors voir dans la membrane une nouvelle étape dans l'architecture de l'Univers : la frontière ne fait plus seulement partie de la structure du système ; elle participe elle-même à son fonctionnement.

Délimiter ne signifie donc toujours pas enfermer.

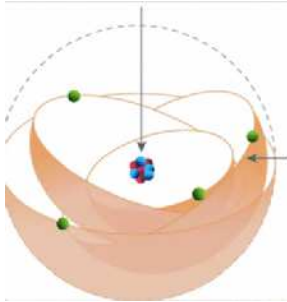
La cellule et son noyau :



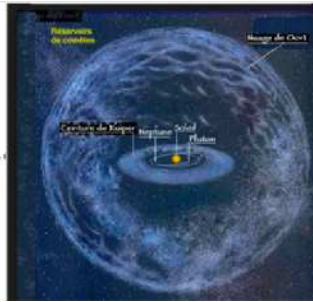
Avec son noyau central et les nombreux éléments organisés autour de lui, cette représentation de la cellule ne rappelle-t-elle pas, d'une certaine manière, celle d'une galaxie ?

L'évolution des limites

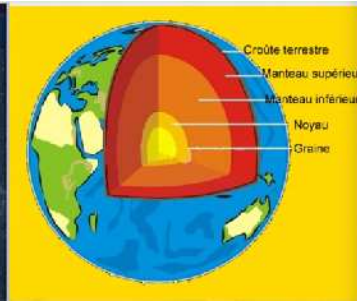
ATOME



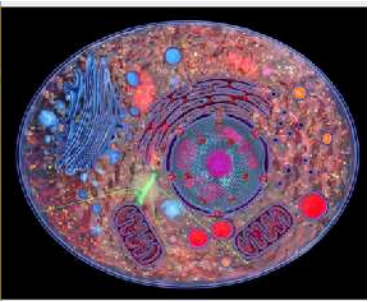
SYSTÈME SOLAIRE



TERRE



CELLULE



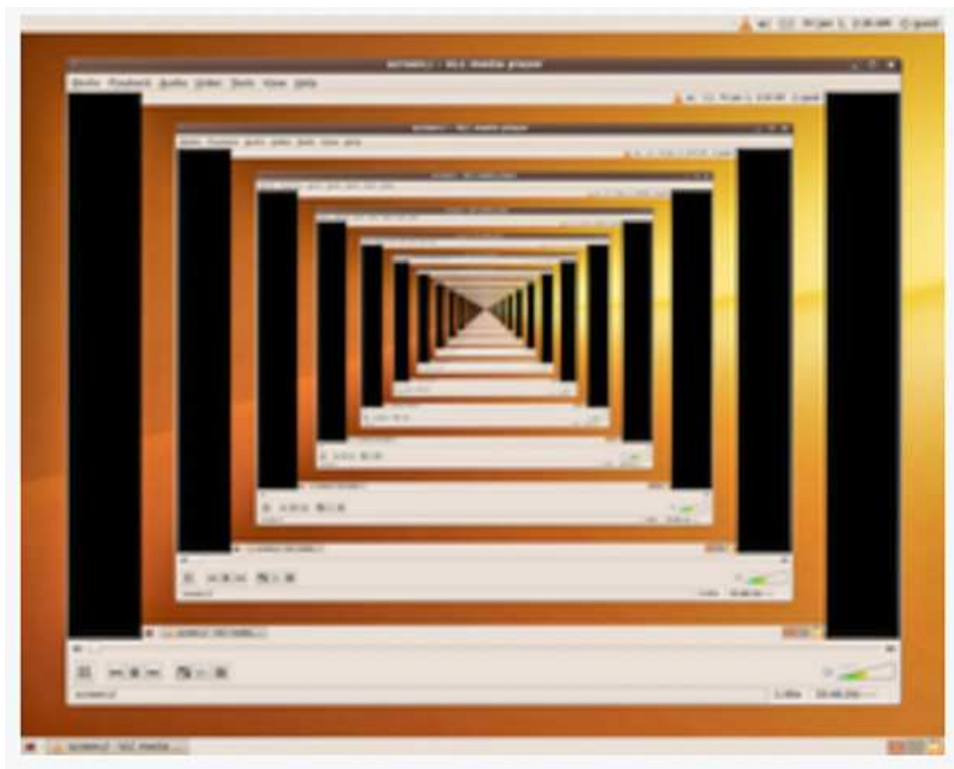
À travers ces différents niveaux du réel, une même logique semble se dessiner :

**relier plutôt que fixer,
protéger sans couper,
organiser sans figer.**

En quelque sorte, tout cela évoque une mise en abyme.

En art et en littérature, la mise en abyme consiste à insérer une œuvre dans une autre œuvre qui lui ressemble : une image dans une image, un film dans un film, une pièce dans une pièce.

Ce procédé crée un effet de miroir : **une répétition partielle d'une forme globale à l'intérieur d'elle-même.**



Dans la Nature, cette image nous invite à regarder autrement ce que nous venons d'observer : **des organisations qui s'emboîtent dans des organisations plus vastes, tandis que certains principes semblent réapparaître d'une échelle à l'autre.**

Et nous retrouvons ici l'un des fils conducteurs de ce livre : tout est relié.

Un système n'existe pas seulement par les éléments qui le composent, mais aussi par les relations qui les unissent. **Lorsque l'un de ces liens se rompt, c'est l'équilibre de l'ensemble qui peut être bouleversé.**

Nous le constatons particulièrement dans la Nature terrestre. Chaînes alimentaires, cycles de l'eau, du carbone ou de l'oxygène, relations entre espèces, sols, végétation, atmosphère : **partout, des chaînes d'interactions relient des éléments dont l'existence et l'équilibre dépendent les uns des autres.**

Modifier un maillon peut alors produire des conséquences bien au-delà de lui.

Tout est relié. Et peut-être est-ce précisément l'une des choses que nous avons encore le plus de mal à comprendre : toucher à une partie d'un système, c'est parfois toucher à l'ensemble.

Nous savons de mieux en mieux décrire ces interdépendances. Mais nous agissons encore trop souvent sans tenir compte des conséquences que la modification d'un élément peut avoir sur l'ensemble.