

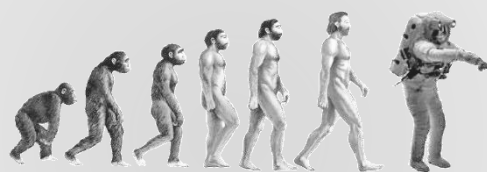
ECO-SAVOIRS

POUR TOUS

l'Univers
la Terre
la Vie
les Sciences

Ouvrage rédigé et illustré par

Marc CARL



AVANT PROPOS

La première vocation de cet ouvrage est de constituer une base documentaire suffisante pour nous aider à bien comprendre le sens historique de notre évolution, jusqu'à son état actuel, et même au-delà, éclairant ainsi son possible futur. Ce qui nécessite des repères historiques et pratiques fiables. En étant alimentée par un inventaire actualisé de nos connaissances et de nos moyens technologiques, notre analyse est alors d'autant mieux capable de continuer à bien orienter nos choix sociétaux, nos projections de développement, et l'avenir de nos descendants.

C'est pourquoi cet ouvrage est d'abord historique et pratique. Il n'a pas pour objet une réflexion critique sur la science et sa méthodologie, ou sur une théorie de la connaissance. Construit plus comme un récit argumenté que comme un traité, il décrit dans le temps une évolution des savoirs liés aux besoins évolutifs des collectivités humaines, en insistant sur le contexte socio-culturel, sur les interactions humaines, et sur les conditions particulières, des découvertes et des découvreurs. Ce qui contribue à révéler les processus adaptatifs sous-jacents, et à éclairer notre trajectoire évolutive.

Bien qu'il y ait un enchaînement coordonné de différents sujets, chaque partie, chaque thème, peut être abordé directement et séparément. Ce qui peut occasionner quelques répétitions et redondances d'un sujet à l'autre, mais l'avantage l'emporte finalement sur l'inconvénient.

La progression de lecture part d'une approche globale, qu'on analyse progressivement en détaillant ses aspects essentiels et ses enchaînements logiques, pour mieux aborder ensuite certaines séquences particulières.

J'ai rectifié, trié, et reformulé plusieurs fois les exposés, en puisant dans diverses publications scientifiques et encyclopédiques, et j'ai actualisé autant que possible les contenus, selon les connaissances de la fin du 20^{ème} siècle. Ce qui implique qu'il faudra tôt ou tard réactualiser encore ces contenus.

Des crédits d'images et des textes-sources tiers ayant été particulièrement variés et adaptés, et puisés dans le domaine public, il aurait été fastidieux, difficile, voire inutile, de les préciser tous. Mais en retour, des illustrations et des extraits de cet ouvrage peuvent être librement repris, commentés, annotés, pour enrichir d'autres travaux.

Mon travail s'inscrit dans une démarche de partage des ressources, et notamment des informations et des connaissances, l'une des bases fortes sur lesquelles doit se développer un éco-humanisme aussi universel que possible, où chaque contributeur peut reprendre et corriger tel ou tel élément antérieur pour améliorer les savoirs qu'il transmet, sous réserve que cela soit fait dans l'intérêt général humain, et sans corruption ni falsification de l'information.

La matière historique ne manque pas, et certaines sources remontent loin dans le temps. Par exemple, des conceptions proto-védiques avaient déjà évoqué depuis plus de 7.000 ans, puis confirmé dans les Vedas au 2^{ème} millénaire avJC, que le phénomène universel originel pouvait être représenté comme un œuf infiniment petit devenant un organisme infiniment grand. L'analogie était étonnamment pertinente pour l'époque, a-fortiori lorsqu'on considère que l'œuf contient intrinsèquement tout ce qui lui est nécessaire pour naître et se développer (de même que notre grande Maison humaine commune) dans l'environnement naturel.

Notre science moderne a confirmé ces pré-sciences (jusque dans la théorie du big-bang), avec des outils conceptuels et technologiques de plus en plus puissants, et surtout, en démontrant que notre espèce suit une trajectoire évolutive exceptionnelle, dont les implications sont immenses. Notre conscience en devient non seulement de plus en plus éveillée, mais aussi émerveillée, devant l'étendue de nos possibles, et de nos capacités croissantes d'amélioration.

MC 23-12-1999

contenu de l'ouvrage :

PARTIE 1 : A LA DECOUVERTE DE NOTRE ENVIRONNEMENT

1. l'écologie humaine	p.11	6. la biosphère	p.71
2. l'environnement universel	p.21	7. à l'origine de la Vie	p.75
3. la Terre et sa géologie	p.31	8. la structure de la Vie	p.81
4. les océans, l'hydrosphère	p.45	9. l'évolution biologique	p.91
5. l'atmosphère et le climat	p.59	10. le vivant mis en ordre	p.115

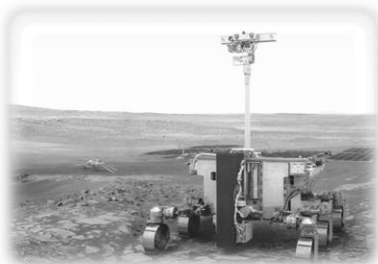
PARTIE 2 : MIEUX COMPRENDRE LA VIE TERRESTRE

1. le monde végétal	p.127	7. la génétique	p.219
2. le monde animal	p.137	8. la vie artificielle	p.237
3. l'espèce humaine	p.159	9. la chimie ancienne	p.251
4. l'anatomie	p.167	10. la chimie intermédiaire	p.269
5. la physiologie	p.173	11. la chimie moderne	p.287
6. l'unité biologique	p.201		

PARTIE 3 : LA MECANIQUE UNIVERSELLE

1. le calcul de la Physis	p.299	7. la physique moderne	p.407
2. les mathématiques antiques	p.311	8. les systèmes dynamiques	p.423
3. les mathématiques classiques	p.321	9. chaos et complexité	p.437
4. les mathématiques modernes	p.347	10. la relativité	p.449
5. la physique ancienne	p.357	11. la mécanique quantique	p.463
6. la physique classique	p.387	12. matière et microstructures	p.473

CONTINUONS A EXPLORER,
encore, et encore,



(rovers martiens)



toujours mieux,
et toujours plus loin,



y compris dans notre
propre passé.

En continuant cette lecture, nous partons donc en exploration dans notre monde, mais aussi dans celui de nos ancêtres, et dans notre possible futur.

C'est un champ d'exploration immense. Pour ne pas nous y égarer, nous devons disposer de repères, dans l'espace et dans le temps, qui nous aident à mieux comprendre et situer notre trajectoire évolutive. A chaque exposé, vous pourrez évaluer et choisir les repères qui vous paraissent les plus pertinents.

Grâce aux avancées de notre science collective, nous avons déjà découvert que depuis environ 550 millions d'années, nous avons d'abord été successivement des invertébrés aquatiques, puis des poissons, des amphibiens, des reptiles, des reptiles mammaliens, et enfin, 350 millions d'années plus tard, des mammifères. Beaucoup plus tard encore, il y a seulement 2,5 millions d'années, notre espèce s'est constituée, par mutation-séparation depuis une souche de singes humanoïdes, puis par diverses hybridations internes.

Mais au regard de la progressivité des séquences évolutives naturelles du reste du vivant terrestre, le développement de notre espèce moderne apparaît comme exceptionnellement rapide, et son accélération est étonnante. Depuis les quelques 3 millions d'Hommes vivant sur Terre au début du mésolithique, on est arrivé à une masse plus de 2000 fois supérieure en l'an 2000, avec plus de 6 milliards d'Hommes.

Or, sauf chez les humains modernes, devenus des acteurs conscients du phénomène, l'adaptation d'un animal à son environnement ne résulte pas d'un projet, mais d'une tendance naturelle qui n'implique pas automatiquement une complexification importante, ni une projection intelligente.

Alors, que s'est-il passé pour nous ? Si notre espèce poursuit un projet naturel particulier de développement, nous avons intérêt à en discerner le sens et les conditions, en comprenant comment nous sommes devenus ce que nous sommes, et conscients de l'être, dans notre environnement d'origine.

Tout ceci de manière scientifique, logique, et appuyée sur un savoir ouvert, non verrouillé par des croyances religieuses ou des superstitions. Car nous sommes devenus trop puissants et trop impactants pour que la nature de notre planète d'origine contribue à réparer nos erreurs en temps utile. Pour mieux pouvoir, nous devons donc toujours mieux savoir, et réviser d'autant nos croyances, sachant que de la qualité de notre savoir dépend la qualité de notre (sur)vie.



LE DEVELOPPEMENT DE L'HUMANITE



Un progrès
parfois à la
limite du pire.

Le pire n'est
jamais certain,
mais les limites
restent proches ...



Sachons
les gérer
au mieux.

PARTIE 1

A LA DECOUVERTE DE NOTRE ENVIRONNEMENT

et de la place prise par l'humanité

L'ÉCOLOGIE HUMAINE

Il est évident que l'évolution de l'Homme a entraîné des interactions exceptionnelles avec son milieu de vie, sur toute la planète Terre. Grâce à son système nerveux perfectionné, l'Etre humain a franchi de nombreuses limites imposées par les systèmes naturels, et il a conquis une position dominante sur l'ensemble de sa planète d'origine. Désormais, notre espèce est l'agent biologique modificateur le plus puissant dans beaucoup de milieux, ce qui influe sur les mécanismes évolutifs du reste de la vie sur toute la planète. Notre espèce a modifié elle-même jusqu'à ses propres caractéristiques évolutives naturelles. De plus en plus intelligemment renforcée par sa socialisation, elle s'est rendue capable de conceptualiser et de maîtriser suffisamment d'information pour pouvoir imaginer et construire des moyens de plus en plus complexes, selon ses besoins.

En maîtrisant l'information nécessaire à son propre système, elle s'est ainsi rendue capable de piloter son propre développement, y compris génétique, ce qui en fait une espèce consciemment mutante. Et ceci va déjà très loin : alors que, comme tout autre organisme animal, l'Etre humain a toujours dû se nourrir d'autres organismes, animaux ou plantes, sa technologie lui permet désormais de synthétiser artificiellement sa nourriture, par des manipulations moléculaires adéquates. Il devient ainsi le premier représentant d'un nouvel organisme super-animal, c'est à dire d'un organisme animal ayant aussi les caractéristiques des plantes, seules capables jusqu'alors de produire directement leur substance organique à partir de l'environnement physico-chimique et énergétique naturel.

Et ce super-animal programme de mieux en mieux le plus puissant bio-ordinateur naturel connu, son cerveau, dont plusieurs milliards d'exemplaires sont devenus coordonnables, par une socialisation croissante. Malgré tout, nous nous trouvons dans une situation paradoxale. Car nous savons, grâce aux connaissances acquises, que nous ne pouvons pas nous passer de la nature, mais nous avons parfois tendance à agir en affaiblissant la capacité de notre biotope planétaire à supporter les prélèvements et les émissions d'une population humaine en expansion.

Notre potentiel d'impact sur les milieux planétaires (encore mal évalué, et par là souvent imprudent) s'est accentué dans des phases relativement courtes, si on les compare aux rythmes d'évolution des autres écosystèmes.

Vers 1800, nous avons atteint le premier milliard d'êtres humains, et en l'an 2000 nous en avons recensé environ 6 milliards. Les petits centres urbains où les transports s'effectuaient par traction animale sont devenus d'immenses métropoles, avec des dizaines de millions de personnes véhiculées par des millions d'engins motorisés. Les grands systèmes de production et de distribution d'énergie et de biens produisent une grande quantité de déchets, qui ont bouleversé çà et là le territoire naturel, et qu'il faudra désormais bien recycler pour ne pas nous empoisonner.

Mais en dépit du progrès extraordinaire de nos connaissances, concernant la réalité physique, chimique et biologique observable, nous avons encore une compréhension insuffisante des équilibres dynamiques des systèmes naturels, de leur évolution, et de leur capacité de réaction aux interventions humaines. En fait, nous vivons une période transitoire, où d'un côté, nous modifions de plus en plus de systèmes de notre biotope, par des interventions parfois lourdes, et d'un autre côté, en dépit des progrès de notre science, nous ignorons encore beaucoup de choses.

Nous avons une difficulté à comprendre parfaitement la complexité interactive de cette nature, et donc aussi à gérer le système Terre que nous avons colonisé, parce que nous utilisons un appareil perceptif et cognitif biologique aux capacités magnifiques mais limitées (notre cerveau). Nous l'avons déjà bien sur-programmé, par notre culture, mais les phénomènes, les événements, les autres êtres observés, l'objet et le sujet de l'observation, n'y sont pas encore reliés dans un tout assez cohérent, et nous ne pouvons en voir que certaines manifestations et apparences.

Faute de mieux, notre science avance en analysant cette réalité appariante, en la classant en parties, en étudiant les éléments qui composent l'ensemble, ce qui nous aide à approfondir l'étude de nos interactions avec telle ou telle partie de notre environnement, en décryptant sa complexité. Mais pas toujours assez objectivement, puisque nos valeurs, nos idéologies, notre culture au sens large, influencent aussi notre capacité cognitive et d'analyse. Il faut être conscient de tous ces facteurs combinés, pour éviter d'entrer dans l'impasse d'une confiance excessive dans nos représentations culturelles du moment, tous super-animaux savants que nous soyons devenus. Beaucoup de choses restent à mieux comprendre, et beaucoup d'informations ne sont pas encore accessibles.

Mais notre grande Maison humaine se construit malgré tout, et sa science intrinsèque, l'écologie, étudie de plus en plus les interactions entre les êtres vivants et les milieux dans lesquels ils vivent. Le terme écologie a été introduit par Ernst Haeckel (1834-1919) dans son œuvre de 1866 *Morphologie générale des organismes*, pour définir l'étude des diverses "maisons communes" du vivant dans leur milieu (terme issu du grec, oikos, maison, et logia, étude).

Haeckel, disciple allemand de Charles R. Darwin (1809-1882) et amateur de néologismes, voulant mettre de l'ordre dans les différentes branches de la recherche scientifique de son époque, avait suggéré d'appeler écologie un domaine d'études incluant la science de l'économie, des habitudes, et des comportements, par lesquels les organismes interagissent et s'adaptent. En pratique, il s'agissait de la science des rapports des organismes vivants avec leur monde ambiant, leur habitat, leurs habitudes, mais aussi avec les énergies et les symbioses liées.

Haeckel avait ainsi introduit un terme savant pour une nouvelle science mais, comme l'écrivit à juste titre en 1927 Charles Elton, considéré comme le fondateur de l'écologie animale, dans son classique *Animal Ecology*, l'écologie est un terme nouveau qui se réfère à une chose très ancienne. Plusieurs historiens des sciences ont rattaché la naissance de l'écologie à l'école milésienne, d'autres à l'époque où Aristote (384-322 avJ.C.) réalisa son œuvre, et d'autres à la notion d'économie de la nature proposée par le naturaliste suédois Carl von Linné (1707-1778) au 18^{ème} siècle.

Ce qui est remarquable, c'est que tous ces savants ont su mettre en relation les espèces, entre elles et dans leurs milieux de vie, et qu'ils ont analysé la nature de manière globale et imbriquée. Ils ont ainsi défini les caractéristiques principales d'une véritable discipline scientifique. De même que l'anthropologue Claude Lévi-Strauss qualifiait l'anthropologue d'astronome des sciences de l'Homme, on définira l'écologiste, plus largement, comme un astronome des sciences de la Vie, y projetant un regard humain. Dans cet esprit, au 20^{ème} siècle, l'éco-humanisme a pu confirmer la complémentarité naturelle de l'écologie et de l'humanisme, jusque dans leurs formes modernes, qui ont intégré un fond philosophique et une projetabilité compatibles.

Eugene et Howard Odum soulignaient que l'écologiste utilise dans ses études un instrument imaginaire, le macroscope, pour faciliter une approche globale zoomable. Que voit-on dans ce macroscope ? Si l'on distingue les différents niveaux d'organisation de la nature, du plus simple au plus complexe, on peut identifier des atomes, des molécules, des cellules, des organismes, des niveaux intermédiaires de populations d'organismes (biocénoses, écosystèmes, biomes) et enfin la biosphère, l'ensemble global.

Le domaine d'étude de l'écologie s'étend donc jusqu'aux niveaux complexes et imbriqués du vivant global (écosystèmes et biosphère), où elle fait même intervenir certains concepts physiques et mathématiques d'analyse des systèmes et de traitement quantitatif de l'information, information nécessaire aux bio-systèmes, et révélant leurs caractères évolutifs distinctifs.

C'est ainsi que l'écologie moderne, reliée à la fois aux sciences humaines et aux sciences naturelles, fait interagir plusieurs disciplines complémentaires dans des rapports déductifs et intuitifs fructueux. Dès les origines de cette science, plusieurs chercheurs en ont souligné l'importance interdisciplinaire. Barrington Moore, le premier président de l'American Ecological Society, lors d'une réunion en 1919, déclarait que l'écologie était une science de la synthèse, essentielle pour comprendre le monde dans sa globalité.

Aristote a été considéré comme un précurseur notable de la vision écologique, dans la mesure où même si ses descriptions ont un caractère typiquement naturaliste, surtout les descriptions de type zoologique, elles posent des questions de fond et suggèrent des réflexions sociétales connexes, et par là, déjà éco-humanistes. Quelques auteurs anciens ont suivi cette voie, en analysant des formes particulières de vie, comme Théophraste (env. 371-288 av. J-C) ou Pline l'Ancien (23-79), dont la célèbre *Naturalis historia*, pendant quinze siècles, constituera le patrimoine commun de nombreux savants et artistes.

L'influence motrice de ces précurseurs sur l'évolution sociétale a toutefois diminué pendant certaines périodes. Car après eux, les progrès de la connaissance libre ont été temporairement freinés par l'emprise des religions monothéistes abrahamiques (judaïsme, christianisme, puis islam), qui attribuaient une grande importance au rôle dogmatiquement central de l'espèce humaine sur Terre, en séparant l'Homme de la Nature, avec une forte primauté du premier par rapport à la seconde. Le caractère animiste de la complémentarité Homme/nature, longtemps présent dans les cultures populaires antiques, et encore résiduel aujourd'hui dans quelques cultures survivantes, est donc resté pendant plus de 2.000 ans une référence minorée dans la pensée des sociétés empreintes de religiosité abrahamique.

Là, pendant plusieurs siècles, la science s'est prudemment cantonnée dans un rôle de contribution à la faculté de raisonner, mais sans contrarier les dogmes pieux temporairement imposés. Devant tempérer ses analyses non conformes à la doxa, la science a continué à explorer la nature comme s'il s'agissait d'une grande horloge mécaniste, qu'il fallait désassembler avec circonspection pour en comprendre les lois et les engrenages.

Puis certains esprits se sont réveillés, surtout lors de la Renaissance européenne, jusqu'à ce que, par réaction à cette tendance trop mécaniste, le géologue James Hutton (1726-1797), inspiré par l'analogie entre la circulation sanguine de notre corps et la circulation de l'eau sur la planète, propose une représentation de la Terre comme un supra-organisme quasi-vivant, dans une approche physiologiste presque comparable à celle de la médecine, et considérée depuis comme un fondement de l'écologie scientifique.

Il s'agissait d'une vision rupturielle, impliquant une analyse du milieu naturel dans une logique de complémentarité systémique globale, différente de l'esprit restrictif et réductionniste des sciences de l'époque, particulièrement spécialisées, sectorielles, et sensibles au conformisme religieux. Ce qui ne signifiait pas que tout ce qui était réductionniste était mauvais, et que tout ce qui était global était bon, mais que la science analysait dès lors avec moins de dogmatisme la pertinence respective de ces approches.

Et c'est justement à partir de cette question d'équilibre pertinent, appliqué à l'équilibre général de la nature, qu'au milieu du 18^{ème} siècle, le naturaliste suédois Carl von Linné a commencé à consolider les premières fondations de ce qui allait devenir l'écologie moderne. A son époque, une nouvelle tendance à rechercher l'équilibre et la globalité des phénomènes biologiques était confortée par de grands voyages d'exploration et de recherche des européens, qui favorisaient les progrès des analyses de type écologique, même si à l'origine, ils avaient surtout pour but de conquérir de nouvelles terres à la recherche de plus de ressources géo-stratégiques.

Alexander von Humboldt (1769-1859), naturaliste et géographe allemand, ami de Goethe, compte parmi ceux qui, entre le 18^{ème} et le 19^{ème} siècles, par leurs travaux, ont contribué le plus nettement aux progrès de l'écologie. Avant de partir pour une expédition de cinq ans en Amérique centrale et en Amérique du Sud, von Humboldt avait écrit à son ami Karl Freiesleben en 1799 : *je tâcherai de découvrir l'interaction entre les forces de la nature et les influences exercées par le milieu géographique sur la vie végétale et animale. Autrement dit, je me propose d'explorer l'unité de la nature.*

Après son retour de ce long voyage, von Humboldt écrit encore : *dans la forêt amazonienne aussi bien que sur les hautes cimes des Andes, j'ai toujours été conscient qu'une seule haleine, d'un pôle à l'autre, donne aux roches, aux plantes, aux animaux, et au cœur de l'Homme, une seule et même vie.*

L'œuvre de ce célèbre géographe a été caractérisée par une vision globale de la nature, qui confortait les contributions préalables de Linné et Hutton, et qui préparait le terrain à Charles Darwin.

En effet, Charles R. Darwin a pu établir en 1859 une solide théorie de l'évolution des espèces, capitale dans l'histoire de l'écologie. Peu d'autres savants ont autant influencé la perception de la nature au cours des 19^{ème} et 20^{ème} siècles. Darwin considérait la nature comme un réseau de relations complexes, et il affirmait qu'aucun organisme ou aucune espèce ne pouvait vivre indépendamment de ce réseau, où même les créatures les plus insignifiantes pouvaient influencer sur la qualité de vie des autres espèces.

Dans ce cadre darwinien, les animaux essaient chacun de prendre une place dans l'économie de la nature, et la sélection naturelle facilite la survie de ceux qui sont le mieux adaptés. La pensée, les recherches et les réflexions de Darwin ont influencé toute la recherche écologique qui a suivi.

Pour sa part, le botaniste danois Eugène Warming a été considéré lui aussi comme un pionnier notable de l'écologie scientifique. Auteur de plusieurs ouvrages, notamment en 1895 de "L'écologie des plantes", une introduction à l'étude des communautés des plantes, il y aborde de façon approfondie ce que l'on peut définir comme la base de l'écologie végétale.

Il y effectue une vaste révision corrélée des facteurs environnementaux, avec l'influence de la lumière, de la température, de l'humidité et de l'eau, sans négliger les propriétés chimiques et physiques du sol et les rétroactions des plantes et des animaux sur le sol. Warming aborde les dynamiques et les compétitions intra et inter-spécifiques, et il analyse les mécanismes d'adaptation des espèces à leur milieu. Il insiste sur le fait que l'objectif de sa recherche consiste à pouvoir démontrer scientifiquement que chaque membre d'une biocénose est en rapport morphologique, anatomique et physiologique avec les autres constituants du milieu dans lequel il vit.

Au cours du 20^{ème} siècle, l'écologie va s'affirmer de plus en plus comme une science mature et bien définie. En 1913 naît en Angleterre la première société scientifique d'écologie, rapidement suivie en 1915 par la création semblable d'une société américaine. De nombreux écologistes contribuent, par leurs études et leurs recherches, à mieux définir le domaine d'action et à approfondir davantage le fonctionnement des systèmes naturels, au cours de cette importante période de maturation. On peut citer, parmi tant d'autres, Frederic Clements, Henry Gleason, Victor Shelford, Charles Adams, Charles Elton, et René Dubos.

De nouveaux termes et concepts sont élaborés : la "succession" essaie d'analyser les différentes phases d'évolution d'une communauté vivante ; le "climax" identifie la phase théorique optimale d'évolution d'une communauté biologique.

Les "pyramides alimentaires" permettent de situer les relations alimentaires complexes entre les différentes espèces vivantes, etc. Au milieu des années 1930, Arthur Tansley introduit l'idée d'écosystème, affirmant que la notion la plus importante à considérer est l'entité d'un système (dans un sens proche de celui utilisé en physique), qui comprend non seulement l'ensemble des organismes, mais aussi l'ensemble des facteurs physiques qui forment ce que nous appelons un biome, avec notamment les facteurs d'habitat au sens large. Ces systèmes, appelés dès lors écosystèmes, présentent une grande diversité de types, de dimensions, et de comportements.

De leur côté, d'autres écologistes ont tenté de comprendre les flux énergétiques opérant entre les différents constituants d'un écosystème, et ils ont proposé des analyses éco-énergétiques des milieux. Le célèbre article de Raymond Lindemann de 1942 sur l'écologie du lac Cedar Bog, publié dans *Ecology*, illustre bien l'approche éco-énergétique du 20^{ème} siècle. Lindemann y confirmait comment sa méthode d'analyse permettait d'apprécier scientifiquement les processus biologiques naturels selon leurs interactions. Les bilans énergétiques des écosystèmes devinrent un sujet particulièrement approfondi par les frères Odum. À Eugene Odum, on doit la publication d'un traité d'écologie, publié pour la première fois en 1953, qui, aujourd'hui encore, avec ses éditions successives, reste un point de repère notable pour la compréhension de la biosphère. Cette voie étant balisée, au cours des dernières décennies du 20^{ème} siècle, le domaine d'analyse de l'écologie scientifique s'est organisé parallèlement, et parfois conjointement, avec celui de l'éco-humanisme, par lequel une Maison humaine commune associe de manière complémentaire, et de plus en plus efficacement, sa dimension environnementale et son organisation sociétale.

Dès lors, divers chercheurs ont effectué des analyses et des études sur les fluctuations des populations, sur les modèles de leur distribution, sur l'évolution des systèmes naturels, sur les cycles des éléments fondamentaux (carbone, oxygène, azote, etc.), sans oublier la résistance des systèmes naturels aux changements impulsés par l'intervention humaine (y compris par l'émission de radiations, la diffusion de substances polluantes, etc). D'autre part, l'utilisation des techniques modernes de détection à distance, fondées sur l'emploi de satellites artificiels, a permis de lancer de grands programmes de contrôle et de surveillance combinés des systèmes naturels de la planète, comme le Programme International Géosphère-Biosphère.

L'écologie a profité en outre des progrès de la génétique, de la biologie moléculaire, des sciences de l'évolution, et de la biologie de la conservation, et elle a perfectionné d'autant mieux ses méthodes d'analyse.

De nouvelles approches sont nées, telles que celle de l'écologie du paysage (Landscape Ecology), qui propose d'analyser les problèmes environnementaux dans une vision d'ensemble du paysage concerné, ou telle que l'écologie du rétablissement (Restoration Ecology), qui vise à approfondir l'évolution des systèmes naturels pour les rétablir au mieux après des impacts éventuellement néfastes. Ce qui a facilité aussi une analyse critique et prospective mieux argumentée des effets anthropiques.

Une contribution particulièrement utile dans ce sens a été apportée dans les années 1970, par des recherches et des travaux sur la coévolution imbriquée du domaine sociétal et du domaine environnemental. Ce qui a évidemment renforcé aussi l'éco-humanisme, dont la démarche prospective implique que le bon développement de la Maison commune de l'Humanité soit garant de l'équilibre de tout le milieu naturel où elle interagit. Ceci pour autant que l'Humanité reste capable de bien comprendre son environnement, et de s'y adapter de mieux en mieux.

Car l'adaptation de l'Humanité à l'évolution d'un environnement soumis à l'aléatoire, au chaos, à l'accident, dépend de son savoir, donc de sa culture, qui gouverne son autocorrection, et de là l'optimisation de son organisation et de sa cohésion. Autrement dit, notre adaptation permanente à l'aléatoire dépend de notre qualité culturelle, et même s'il est évident que les systèmes naturels présentent une grande complexité intrinsèque -d'où notre difficulté à faire des prévisions sur leur évolution- il faut toujours mieux les comprendre pour pouvoir mieux les gérer.

Nos connaissances et nos moyens d'investigation doivent évoluer en conséquence. Et le travail à faire reste considérable, notamment parce que dans des systèmes complexes, non linéaires et chaotiques, de petits changements peuvent entraîner, avec le temps, des variations beaucoup plus grandes et imprévisibles.

Nos meilleurs modèles de prévision informatisés sont devenus capables de nous fournir le sens, la direction générale, selon laquelle un système évolue, mais ils ne peuvent pas prévoir exactement ce qui aura lieu. Ils nous disent seulement ce qui pourrait probablement avoir lieu. L'observation peut lever une partie du doute, mais seulement au moment où elle est effectuée ; aussitôt après tout peut changer.

C'est pourquoi nos meilleurs moyens scientifiques nous apportent seulement une compilation et une analyse de l'information disponible (encore généralement insuffisante), avec une description des apparences, et un calcul plus ou moins approfondi des probabilités.

Les grandes théories les plus fondamentales, comme celle de la mécanique quantique, ne peuvent d'ailleurs être comprises que dans ces conditions. Il est important de prendre conscience de cet état très relatif des choses.

Nous sommes logiquement amenés à en déduire que nous devons rester en permanence capables de réagir, donc capables de nous adapter en temps opportun, aux changements, notamment imprévus, de notre environnement, que nous devons pour cela continuer à connaître le mieux possible, de manière à pouvoir le gérer et y interagir le mieux possible.

C'est pourquoi, dans cet ouvrage, nous allons progressivement faire un point sur nos connaissances, en suivant le fil historique des découvertes scientifiques majeures faites depuis les 3 derniers millénaires, concernant le cosmos, la Terre, la vie sur Terre, et l'état des substances et des forces qui nous permettent d'y exister. Nous pourrions d'autant mieux projeter notre avenir.

Car dans tous les cas, il faudra continuer à partager et à projeter nos connaissances de manière efficiente, sachant que l'ensemble continuellement actualisé de ces connaissances doit nous permettre d'alimenter à la fois notre raisonnement conscient et notre intuition, individuelle et collective, qui souvent peut débloquer des contradictions scientifiques et philosophiques, et de là, nos choix évolutifs modernes.

Autrement dit, le patrimoine actualisé de nos connaissances collectives doit être soigneusement préservé, et transmis aux générations suivantes, qui pour mieux pouvoir, devront elles aussi, à leur tour, continuer à mieux savoir ; on ne le répètera jamais assez. Notre savoir collectif nous ayant été transmis, et amélioré, par nos ancêtres, nous devons continuer à le transmettre aussi bien, à notre tour, à nos descendants. Sans cela, ils régresseraient dans leur développement, et pourraient faire des fautes évolutives fatales.

Dans ce sens, ce livre a pour vocation de contribuer à l'indispensable transmission permanente des connaissances d'intérêt général humain, dont l'actualisation, et l'amélioration connexe, dépendent de leur meilleur partage possible dans toute la communauté humaine vivante. Ce qui est l'une des buts principaux de l'éco-humanisme, philosophie existentielle du fait humain.

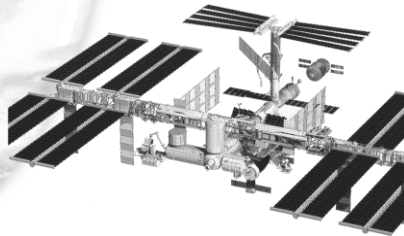
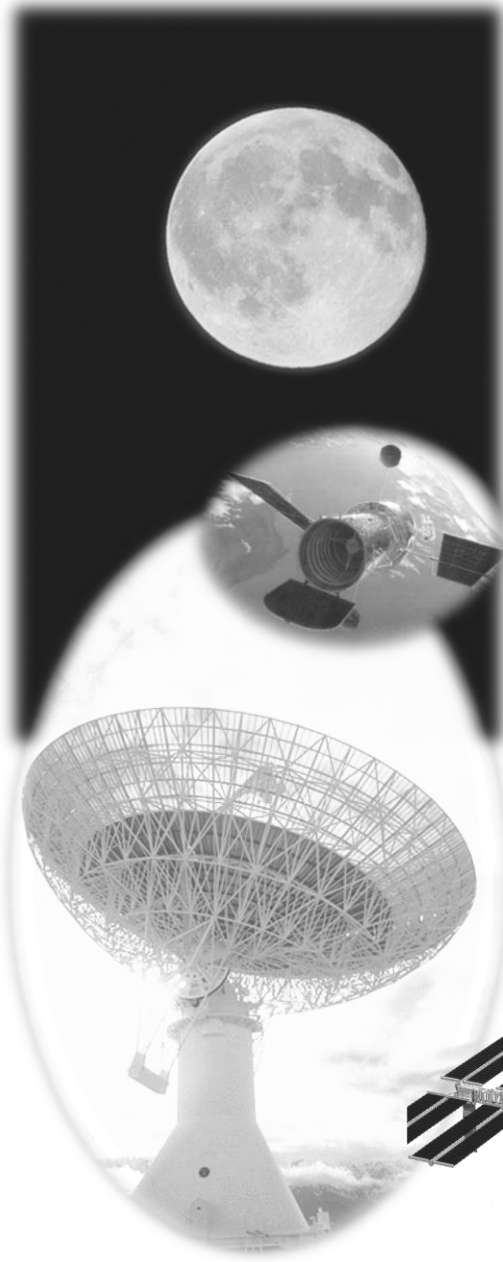
En continuant à progresser dans cette lecture, nous allons, dans les exposés suivants, nous situer d'abord dans l'environnement le plus global et le plus vaste que nous puissions percevoir, le cosmos, avant de revenir à notre petite planète originelle, et à ses particularités, notamment à sa biosphère. Nous passerons ensuite en revue les outils et les savoirs qui nous servent à explorer cet environnement et à renforcer notre adaptation à ce que nous découvrons.

L'ESPACE

Une nouvelle
frontière
collective de
l'humanité.

Un
espace-temps
immense à
explorer et à
utiliser, qui
motive la
recherche
scientifique et
technologique.

Mais aussi un
ailleurs qui
détermine
un nouveau
sentiment
d'identité
collective
humaine.



L'ENVIRONNEMENT UNIVERSEL

(et ses macro-structures)

La cosmologie (du grec kosmos, Univers) est une science presque aussi ancienne que l'Homo sapiens. Depuis des temps immémoriaux, l'esprit humain s'est interrogé sur l'origine de ce qui l'entoure : la Terre sur laquelle il vit, le Soleil, la Lune, les étoiles, etc. Mais ce n'est qu'au cours du 20^{ème} siècle que des savants ont disposé d'instruments capables d'aider à comprendre et à vérifier de façon de plus en plus exacte la constitution, l'origine et l'évolution de l'Univers dans lequel nous vivons.

La cosmologie moderne dispose de télescopes de plus en plus performants, de satellites et de radio-antennes, de sondes lointaines, permettant de reconstruire l'histoire et la géographie de l'Univers. Un ensemble immense : selon les estimations des astronomes, il y a au moins 2.000 milliards de galaxies, et chacune contient des centaines de milliards d'étoiles.

En outre, ces galaxies ne sont pas distribuées n'importe comment, elles sont regroupées en amas et en superamas, séparés par d'immenses espaces matériellement vides. Notre observation scientifique, qui ausculte la structure de cet Univers pour la comprendre, contribue aussi par voie de conséquence à reconstruire son histoire, et à imaginer son avenir.

Parce que les galaxies paraissent s'éloigner de nous, cela peut signifier que l'Univers est en expansion, et que si l'on pouvait remonter le temps, les galaxies se rapprocheraient de plus en plus, au point que l'Univers aurait théoriquement connu un début, un moment où toute la matière était comprimée au maximum possible. Ce moment a été calculé à 13,7 milliards d'années environ, quand tout aurait commencé par une expansion subite, appelée big-bang. L'Univers devait être alors une espèce de boule d'énergie extrêmement chaude et dense. Et à partir de cet état, il semble avoir commencé à se dilater et à se refroidir de plus en plus.

Au bout de quelques minutes, les premiers éléments d'atomes se sont synthétisés, mais ce n'est qu'un million d'années après ce présumé big-bang que se sont formés les premiers vrais atomes (noyaux ayant capturé des électrons) et que la matière que nous connaissons a commencé à s'agréger sous l'effet de la force de gravité. Peu à peu sont nées des étoiles, des planètes, des galaxies, etc, jusqu'au monde que nous connaissons.

Mais de grandes interrogations subsistent. Quelles sont les vraies dimensions de cet Univers ? De quelle substance est-il vraiment constitué ? Comment finira-t-il ? C'est à ces questions et à bien d'autres que s'efforcent de répondre les spécialistes scientifiques qui s'occupent de cosmologie.

Commençons par observer notre milieu local. Quand on regarde le ciel depuis la Terre, par nuit claire, on peut distinguer au loin, sur un fond sombre parsemé d'étoiles, une sorte de brume un peu lumineuse. C'est la signature de notre propre galaxie, la Voie Lactée, sur la voûte céleste visible. Dans cette galaxie, la planète sur laquelle nous vivons, la Terre, fait partie d'une famille cosmique locale, où avec le Soleil, ses planètes et d'autres corps mineurs, elle forme ce que l'on appelle le Système solaire. Au centre, brille le Soleil, une étoile composée pour l'essentiel d'hydrogène, et qui contient 99,85 % de la matière de tout son système.

Avec une telle masse, le Soleil exerce une force de gravité intense sur tous les autres corps qui tournent autour de lui, et principalement sur ses neuf planètes et leurs satellites. Les astronomes distinguent ces planètes selon deux catégories : les planètes telluriques proches, denses, semblables à la Terre dans leur constitution, et les planètes lointaines, en tout ou partie gazeuses, plus légères, appelées joviennes parce qu'elles sont semblables à Jupiter. Il existe en outre une grande quantité de corps plus petits, appelés astéroïdes ou planétoïdes.

Les quatre planètes denses proches, par ordre de distance croissante au Soleil, sont Mercure, Vénus, la Terre, et Mars. Elles ne sont pas très grandes (leurs diamètres sont compris entre 5.000 et 13.000 km), elles ont une surface solide, un noyau central composé de métaux, et sauf Mercure, elles sont entourées d'une mince enveloppe gazeuse appelée atmosphère. La Terre est la seule planète sur laquelle la vie se soit apparemment développée et ait perduré. En l'état actuel de nos connaissances, c'est aussi la seule -avec Mars- qui soit en mesure de l'accueillir. Pour la Terre, ce n'est qu'à sa distance particulière du Soleil que la température de surface reste adéquate pour qu'en même temps l'eau ne gèle pas partout, et qu'elle ne s'évapore pas excessivement.

Heureusement, car l'eau à l'état liquide est le principal milieu dans lequel peuvent se produire les réactions chimiques indispensables à la croissance et à la reproduction des organismes vivants, tels qu'on les connaît.

Les planètes lointaines sont, par ordre de distance croissante du Soleil, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Ces planètes sont moins denses, mais beaucoup plus grandes que leurs cousines telluriques, leur diamètre étant compris entre 50.000 et 140.000 km. Elles sont composées pour l'essentiel de gaz, et il est difficile d'établir une frontière entre leur atmosphère et leur surface solide. La plus lointaine de ces planètes, Pluton, bien qu'elle se trouve dans la zone des planètes joviennes, a des caractéristiques hybrides. Il s'agit d'une planète dense et de petite taille, dont les dimensions sont comparables à celles de notre Lune. C'est pourquoi on tend à penser que ce n'est pas une planète comme les autres, mais un satellite de Neptune qui aurait échappé à l'attraction de sa planète.

Effectivement, les principaux autres objets massifs du Système solaire sont des satellites. Certains se sont probablement formés en même temps que la planète autour de laquelle ils gravitent, tandis que d'autres ont été piégés par elle dans un deuxième temps. Saturne et Jupiter comptent le plus grand nombre de satellites. Mars a seulement 2 satellites, la Terre n'en a qu'un (la Lune), tandis que Mercure et Vénus en sont dépourvus. Pour leur part, les planètes joviennes ont une autre caractéristique distinctive : elles sont entourées d'un système d'anneaux formés de petits corps solides. Saturne est la planète dont le système d'anneaux est le plus développé, ces anneaux ayant été découverts à l'aide des premiers télescopes du 17^{ème} siècle. Il existe enfin une classe de nombreux petits corps qui gravitent, soit dans l'espace compris entre les deux groupes de planètes, soit au-delà de l'orbite de Pluton. Selon leur nature, ces corps sont appelés astéroïdes (ou micro-planètes), comètes, ou météorites.

Les astéroïdes sont des corps solides de petites dimensions, qui occupent pour la plupart l'espace situé entre les orbites de Mars et de Jupiter. Les comètes sont des conglomerats de roches et de glace dite sale (mélange d'eau, d'ammoniac, de méthane, etc.) de quelques kilomètres de diamètre. Elles sont répandues dans l'ensemble du Système solaire, mais on pense qu'il existe une sorte de réservoir de comètes situé à la périphérie du système, à très grande distance du Soleil. Quand elles sortent de ce réservoir et quand elles se dirigent vers l'intérieur du système solaire, les comètes subissent un changement spectaculaire. Sous l'effet du rayonnement solaire, leurs gaz se subliment et forment une longue traînée, la queue.

Quant aux météorites, ce sont des fragments de roches et de métaux, dont les dimensions, en règle générale, varient de quelques dizaines de mètres à quelques millimètres. Elles circulent dans l'espace interplanétaire, et quand elles sont attirées par telle ou telle planète, elles y tombent, en y creusant des cratères si le sol est solide et si leur masse est assez forte. Quand la planète est entourée d'une atmosphère gazeuse, la météorite qui la traverse y subit des modifications. Elle peut se consumer en tout ou partie, en s'échauffant par suite du frottement dû à la résistance de l'atmosphère. C'est la cause du phénomène des étoiles filantes que l'on peut observer par les nuits d'été sur Terre.

La genèse globale du système solaire est désormais mieux connue. L'origine de ses divers composants remonte à l'époque de la formation du Soleil, il y a environ 4,6 milliards d'années. À cette époque, un grand nuage local de gaz et de poussières en rotation lente (la masse protosolaire) s'est contracté, et condensé, puis sa densité et sa température centrale ont augmenté jusqu'à atteindre des valeurs suffisantes pour amorcer des réactions thermonucléaires, et une étoile incandescente (le Soleil) s'est activée.

En se contractant, le reste du nuage protosolaire s'est aplati en disque et a engendré des planètes, par un processus qui a duré au moins 100 millions d'années, pendant lequel de nombreux grains de matière se sont concentrés progressivement çà et là. Les conditions physiques du disque étaient très différentes entre le centre et la périphérie. Au centre intervenaient les températures et les pressions les plus élevées, pendant que les matières les moins denses se dispersaient en périphérie.

Les planètes telluriques proches du Soleil ont ainsi pu se former par attraction-accumulation de petits corps denses, alors que vers la périphérie, au-delà de la ceinture d'astéroïdes, la température et l'attraction plus faibles ont favorisé la condensation et la combinaison de composés contenant de l'hydrogène, de l'hélium, du carbone, et de l'azote, jusqu'à former des planètes gazeuses géantes. C'est la raison pour laquelle les planètes internes sont constituées de masses solides et denses, tandis que les planètes externes sont moins denses et plus volumineuses (à l'exception de Pluton).

Quel est l'avenir de tout cela ? Les astrophysiciens stellaires, qui se consacrent à l'étude des étoiles et de leurs mécanismes de fonctionnement, ont découvert que chaque étoile a son propre cycle évolutif, et qu'elle ne dure pas éternellement. Elle naît, se structure, et atteint une situation très chaude, qui dure quelques milliards d'années. Pendant cette phase, notre étoile-Soleil transforme son hydrogène en hélium.

Une fois l'hydrogène épuisé, l'étoile commence à convertir l'hélium en éléments encore plus complexes, et elle devient une géante rouge. Les étoiles de petite ou moyenne masse (comme le Soleil) évoluent ensuite vers un état dégénéré de naines blanches, parce que leur température centrale est insuffisante pour amorcer d'autres réactions de fusion nucléaire.

Mais les étoiles les plus massives (plus de huit à dix fois la masse du Soleil) parviennent à une température centrale suffisante pour produire d'autres cycles de fusion nucléaire. S'y forment alors des éléments de plus en plus complexes, jusqu'au fer. Pour finir, une telle étoile devient finalement instable, son cœur s'effondre, et son enveloppe extérieure est éjectée dans une explosion gigantesque, appelée supernova. Il en reste un résidu très compact, une étoile à neutrons, ou un trou noir pour les plus grandes.

Les étoiles se présentent ainsi sous une grande variété de masses, de luminosités, de couleurs, et de compositions chimiques. Cela dépend de l'état évolutif dans lequel se trouve chacune, et de sa distance par rapport à notre observation. Les étoiles jeunes, chaudes et lumineuses nous apparaissent en tons plutôt bleus, tandis que les étoiles les plus vieilles, relativement plus froides, nous apparaissent plutôt rouges.

Il est intéressant de rappeler qu'en se servant de ces estimations (au demeurant erronées, étant donné qu'il ne pouvait pas savoir alors quelle était la véritable source de l'énergie solaire), Thomson avait émis imprudemment une objection à la théorie de l'évolution des espèces de Darwin, car selon lui, le Soleil n'aurait pas pu fonctionner plus de quelques centaines de milliers d'années. La suite des découvertes allait corriger cela.

De son côté, William Huggins (1824-1910) qui observait en 1864 ce qu'on appelait alors une nébuleuse planétaire, supposa, selon ses analyses spectroscopiques, qu'elle était constituée de gaz incandescents, puisqu'avant 1920, le terme nébuleuse désignait un amas local de gaz ionisés et de poussières, en ignorant sa vaste consistance matérielle réelle.

Heureusement, au début du 19^{ème} siècle, l'utilisation de télescopes de plus en plus puissants, permettant d'explorer plus loin le ciel, a aidé à déterminer plus exactement la position et le type des astres, des amas, et des phénomènes stellaires. Ce qu'on appela alors l'astronomie de position atteignit une précision inconcevable auparavant. Et les observatoires astronomiques, tels que celui de Greenwich, commencèrent vers la fin du siècle à devenir de modernes laboratoires de physique, où travaillaient des chercheurs désormais professionnalisés et plus nombreux.

Toutefois, dans une telle science, fondée sur l'observation, mais tributaire d'instruments encore imparfaits, et d'une interprétation inexpérimentée des images obtenues, il était encore problématique de distinguer ce qui était l'objet réel observé et ce qui était un effet optique produit par l'instrument et la pollution atmosphérique. Un cas typique fut la découverte des célèbres canaux de Mars par l'astronome italien Giovanni V. Schiaparelli (1835-1910), découverte qui devait temporairement alimenter l'imaginaire populaire sur des rencontres et des invasions d'extraterrestres.

La controverse sur la nature des nébuleuses ne devait être résolue qu'au début du 20^{ème} siècle. Entre-temps, elle avait suscité des débats contradictoires sur l'évolution stellaire, où l'observation insuffisamment précise de nouvelles et très nombreuses nébuleuses spirales avait tout de même contribué à renforcer la thèse selon laquelle ces nébuleuses étaient en phase de formation de nouvelles étoiles. Mais au début du 20^{ème} siècle, presque tous les astronomes étaient encore d'accord pour considérer que les astres observables faisaient partie de notre Galaxie. Ce n'est qu'après le renforcement et la meilleure localisation des observatoires qu'on a pu corriger cela.

Ce renforcement s'est initié principalement aux États-Unis, grâce à la tenace initiative d'astrophysiciens tels que George Ellery Hale (1868-1938) et Percival Lowell (1855-1916), auquel on doit entre-autres la prévision de l'existence d'une neuvième planète au-delà d'Uranus, c'est-à-dire Pluton, observée seulement en 1930. Pour soutenir leurs découvertes, ont été construits les observatoires du mont Wilson, le Lowell Observatory en Arizona, et l'observatoire du mont Palomar (1948), doté alors du plus grand télescope compact à miroir du monde.

Puis leur observation se focalisa sur une immense nébuleuse spirale, déjà localisée à la fin du 19^{ème} siècle, et appelée Andromède. Un assistant de Lowell, Vesto Melvin Slipher (1875-1969), réussit à en obtenir 4 plaques photographiques qui révélaient des raies spectrales très nettes. Le problème était que ces raies, tout en étant analogues aux raies émises par le Soleil et par d'autres nébuleuses, étaient légèrement déplacées par rapport à la position à laquelle on pouvait s'attendre. La seule façon d'interpréter ce déplacement était de penser que la nébuleuse était en mouvement. Et le calcul de la vitesse de déplacement donna un résultat surprenant. La nébuleuse d'Andromède se déplaçait à une vitesse d'au-moins 300 km/s.

En 1914, Slipher avait calculé la vitesse de 15 autres nébuleuses spirales, trouvant que la plupart d'entre elles s'éloignaient du Soleil à des vitesses qui dépassaient 1000 km/s (3,6 millions de km/h).

S'il s'était agi de proto-étoiles internes à la Voie Lactée, elles auraient dû au contraire avoir une vitesse comparable à celle des autres étoiles. C'est ainsi que certains chercheurs commencèrent à penser qu'il pouvait s'agir d'autres galaxies, différentes de la nôtre. La question fut résolue définitivement par les travaux réalisés entre 1923 et 1924 par Edwin P. Hubble (1889-1953). Non seulement il observa, à l'intérieur de la nébuleuse d'Andromède, des étoiles qui présentaient une rapide augmentation de brillance et qui s'éteignaient aussi rapidement (les supernovæ), mais aussi des étoiles dont la brillance variait de façon régulière et périodique (les céphéides). Cette régularité permit d'en mesurer plus précisément la distance, et Hubble releva une distance d'environ un million d'années-lumière. Or, même les estimations par excès du diamètre de la Voie Lactée n'étaient jamais supérieures à 300.000 années-lumière. Par conséquent, Andromède ne pouvait être qu'une autre galaxie.

En fait, une galaxie est un gigantesque amas d'étoiles, de poussières et de gaz, dont la cohésion est assurée par son attraction gravitationnelle interne. La Voie Lactée -notre galaxie- contient plus de 200 milliards d'étoiles, et sa forme, semblable à une grande roue à vent lumineuse, la range parmi les galaxies spirales. Il existe dans l'Univers de nombreuses autres galaxies, séparées par de vastes étendues d'espace vide. Leur forme apparente permet de les classer en galaxies elliptiques (de forme ovale ou sphéroïdales), galaxies spirales (avec des bras de matière tournant autour d'un noyau central), galaxies lenticulaires (de forme intermédiaire entre les elliptiques et les spirales), et galaxies irrégulières (atypiques).

D'autre part, la distribution de ces galaxies dans l'Univers n'est pas uniforme. Elles tendent, en effet, à se réunir en groupes plus ou moins grands qui, à leur tour, peuvent appartenir à des amas encore plus grands. Notre Galaxie fait partie d'un petit groupe de galaxies appelé Groupe Local, auquel appartient aussi la galaxie quasi-jumelle d'Andromède. Le Groupe Local fait à son tour partie d'un conglomerat plus grand, connu sous le nom d'amas de la Vierge. Au milieu du 20^{ème} siècle, on observait déjà plus de 10.000 amas, dont les plus grands comprenaient plus de 10.000 galaxies.

Les galaxies dites actives sont appelées ainsi en raison de la très forte dissipation d'énergie qui les caractérise. Dans certains cas, leur énergie émise peut être des millions de fois supérieure à celle d'une galaxie normale. Parmi les galaxies actives, on distingue les radiogalaxies, les galaxies de Seyfert, les BL Lacertæ, les galaxies à starburst (ou à sursauts de formation d'étoiles), et s'y ajoutent les quasars, considérées comme les objets célestes les plus lointains, témoins d'un Univers plus jeune.

Les galaxies ne sont pas des ensembles qui restent isolés, dans la mesure où elles interagissent occasionnellement les unes avec les autres, souvent même violemment. Elles peuvent changer de forme lors de ces interactions, de façon à former de nouvelles galaxies plus grandes. Dans certains cas, de petites galaxies peuvent aussi être purement et simplement englouties par des galaxies géantes, dites cannibales, qui les attirent par la force de leur intense champ gravitationnel.

Après qu'Edwin P. Hubble ait démontré que l'Univers était peuplé de très nombreuses galaxies, certaines étant semblables et d'autres étant différentes de la nôtre, l'observation astronomique a entrepris une étude plus précise de leurs caractéristiques, en vue d'une classification adéquate. Et là, de nouveaux changements conceptuels ont à la fois accéléré et modifié les priorités et les conditions de ces recherches. En effet, Albert Einstein avait formulé en 1917 sa théorie de la relativité générale, en mettant en relation certaines hypothèses sur la nature de l'Univers, qui impliquaient une nouvelle topologie et une nouvelle typologie stellaires.

Certains astrophysiciens commencèrent dès lors à corrélérer leurs observations astronomiques avec la nouvelle théorie générale de l'Univers induite par la relativité d'Einstein. Parmi ces astrophysiciens, le Hollandais Willem de Sitter (1872-1934), le Russe Aleksandr Aleksandrovitch Fridman (1888-1925) et le Belge Georges Lemaître (1894-1966) commencèrent à conjecturer que l'Univers n'était pas statique. Leurs suppositions amenaient même à rendre plausible, d'un point de vue théorique, la possibilité que l'Univers soit en expansion.

Le support expérimental de cette hypothèse fut fourni une fois encore par Hubble. En observant systématiquement le déplacement des spectres émis par les galaxies, il parvint à formuler une nouvelle loi qui mettait en évidence comment ce décalage vers un refroidissement entropique (appelé aussi décalage vers le rouge, ou redshift) était apparemment proportionnel à la distance à laquelle se trouvait la galaxie observée.

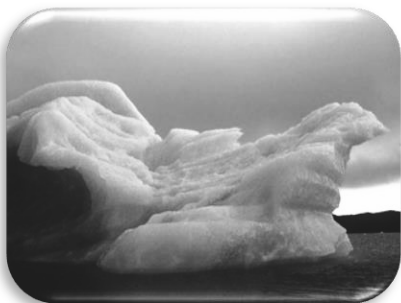
Cette donnée pouvait être interprétée en corrélation avec l'hypothèse de l'expansion de l'Univers. Et par logique inverse, si l'Univers était en expansion constante, en remontant dans le temps, il y a quelques milliards d'années, il pouvait être entièrement contenu dans un volume beaucoup plus petit. Il devenait non seulement possible de parler d'un âge de l'Univers, mais on pouvait imaginer aussi qu'au commencement des temps, à partir d'une masse très concentrée, une forte expansion subite, un big-bang, aurait pu être à l'origine de l'Univers où nous existons.

Pour pouvoir vérifier l'hypothèse de cette expansion originelle, les dimensions de cet univers, et la détermination exacte des distances des galaxies en mouvement, ont continué à être vérifiées, au fur et à mesure des progrès conceptuels et technologiques. Parmi les différentes méthodes de mesure, les plus utilisées ont privilégié la mesure du redshift (décalage vers le rouge) de chaque galaxie, ainsi que l'émission de l'hydrogène interstellaire qui y est présent, et en complément, l'activité comparée d'étoiles de référence, comme les céphéides, ou les supernovæ.

Dans un tel champ d'investigation, les perspectives d'observations, de recherches, et de découvertes restent évidemment très importantes. Toutefois, nous devons être conscients que nous analysons tout cela à partir de référentiels et d'instruments humains, en utilisant et en extrapolant ce que nous avons observé et découvert depuis la Terre, avec notre système cognitif spécifiquement terrien et humain, appliqué notamment au concept et à la mesure d'un référentiel de temps arbitraire, utilisé faute de mieux.

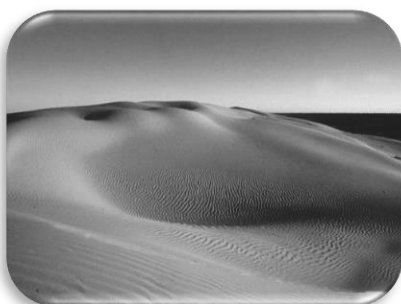
Même si nos progrès technologiques et conceptuels sont évidents, tout ceci doit donc nécessairement être compensé par un doute à la fois constructif et prudent, dont le principe est particulièrement mis en évidence et en pratique dans le référentiel conceptuel éco-humaniste.

Ce relativisme prudent ne nous empêche ni de continuer à découvrir notre environnement cosmique global, ni de continuer à explorer et à mieux connaître notre environnement local, en l'occurrence la planète sur laquelle nous vivons actuellement, la Terre, où en plus de sa propre consistance locale, nous pouvons rechercher et traiter beaucoup d'informations utiles sur la consistance et les forces d'autres parties de notre univers, et sur les conditions d'équilibre et de cohésion de ses divers systèmes.

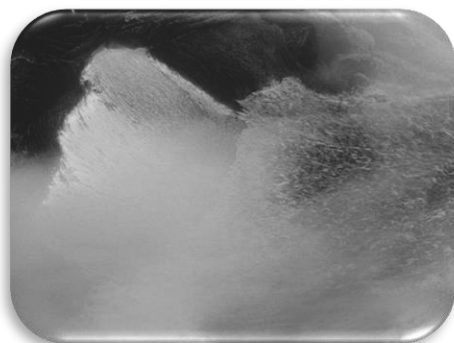


LA SURFACE TERRESTRE

Une magnifique
mosaïque de froid,
de chaud, de sec,
d'humide, de calme,
de tempête, avec des
contrastes extrêmes



... mais dont
l'équilibre dynamique
reste fragile, malgré
la force apparente des
structures naturelles.



LA TERRE ET SA GÉOLOGIE

En s'approchant de notre planète, un visiteur provenant d'ailleurs remarquerait probablement deux faits. D'abord, la présence d'une atmosphère gazeuse, et d'autre part le fait qu'une grande partie de la surface terrestre, environ 70%, est recouverte d'eau. Mais comment pourrait-il décrire la Terre de retour chez lui ? Il pourrait raconter, par exemple, avoir vu une planète faite de différentes couches enveloppantes, enchâssées les unes dans les autres.

L'atmosphère, la couche extérieure, épaisse d'environ 600 km, est un mélange de gaz incluant notamment de l'oxygène, indispensable à beaucoup d'organismes vivants. L'hydrosphère, la deuxième couche, est formée par l'ensemble des eaux, incluant les océans, les lacs, les fleuves et les eaux souterraines. Cette hydrosphère repose sur les matériaux rocheux de la lithosphère, une couche rocheuse solide et refroidie sur laquelle nous pouvons nous déplacer et vivre naturellement. Epaisse de 10 à 35 km, cette croûte repose sur le manteau terrestre, un magma visqueux et très chaud, profond d'environ 3.000 km. Au centre, enfin, se tient un noyau, d'un rayon de plus de 3.300 km, où les températures sont mesurées jusqu'à quelques 5.500 °C (presque autant que les 6.000 °C de la surface du Soleil).

Par rapport au rayon de la Terre (6.371 km), sa croûte superficielle est aussi fine qu'une coquille d'œuf, tout en étant aussi dure et fragile que celle-ci, et donc susceptible de se casser. Elle joue néanmoins un rôle fondamental pour le développement de la vie sur notre planète, puisqu'elle est constituée de roches qui font office d'isolants thermiques.

Les plaques imbriquées de cette croûte solide changent lentement mais continuellement d'aspect. Elles interagissent entre plaques adjacentes par l'effet de divers agents et forces combinés, et en outre, leur surface s'érode. Le Grand Canyon du Colorado, un long fossé de 2 km de profondeur au fond duquel coule le fleuve Colorado, n'existait pas il y a 20 millions d'années ; il a été creusé par les eaux du fleuve, qui y ont exercé une érosion continue.

Comme le Colorado, d'autres fleuves érodent leur sol depuis la partie amont de leur parcours, et ils en transportent les débris vers la mer, ce qui contribue en aval à colmater des zones côtières, par alluvionnement. La plaine du Pô, par exemple, s'est formée grâce à l'action de fleuves et de glaciers, qui au cours de milliers d'années ont déposé des matériaux arrachés aux proches montagnes alpines.

Les changements de la croûte terrestre résultent ainsi de deux forces principales, l'une externe, mue par la chaleur du Soleil, qui actionne l'érosion, et l'autre interne, mue par le fait que les matériaux enfouis à des milliers de kilomètres de profondeur ont la particularité de déplacer en permanence une partie de leur potentiel calorique et de leur substance malléable. Ces deux agents combinés ont une puissance considérable. La chaleur interne dissipée par la Terre correspond à environ 1.000 fois l'énergie libérée chaque année par les tremblements de terre et est 250.000 fois plus forte que l'énergie libérée par l'explosion d'une bombe nucléaire d'un million de tonnes de trinitrotoluène (TNT).

Cette chaleur interne (géothermique) alimente des sources thermales chaudes, et des éruptions volcaniques, et surtout, elle entretient de lents mouvements de la surface terrestre qui ont pour effet de provoquer des failles d'un côté, et de fortes compressions d'un autre côté, entre les zones de contact. Ces mouvements sont à l'origine de gigantesques renflements (les montagnes) et de la dérive des continents.

Quant à la chaleur externe (solaire), elle impacte l'atmosphère et les océans, modifie le climat, et en combinaison avec les pluies et les vents produits, elle érode les roches des montagnes, et en général toute la surface planétaire, formant des débris qui, transportés par les fleuves, modifient des zones côtières. Ayant appris à connaître ces flux de chaleur exogènes et endogènes, nous nous développons en les utilisant au mieux, sur la couche d'interface tempérée constituée par la croûte solide terrestre.

Là, des éruptions volcaniques et des impacts sismiques peuvent changer l'aspect d'un territoire en peu de temps, mais généralement, à l'échelle temporelle humaine, l'aspect de la Terre se modifie lentement. Il faut des centaines de millions d'années pour que se forme un océan, environ 20 millions d'années pour qu'une montagne s'élève, et encore des dizaines de millions d'années pour qu'elle soit nivelée jusqu'au niveau de la mer. En ce qui concerne les phénomènes d'expansion lente des fonds des océans, de part et d'autre des diverses failles, cela se produit à une vitesse de quelques centimètres seulement chaque année.

Ces failles sont des fractures d'où sort une matière magmatique semblable à celle que rejettent aussi les volcans pendant leurs éruptions, et qui se solidifie en surface en s'ajoutant à la croûte existante, pendant qu'à une autre extrémité la croûte redescend dans le magma pour s'y refondre.

La croûte terrestre est ainsi répartie en grandes calottes courbes (les plaques tectoniques) qui se déplacent lentement à la surface du manteau magmatique. Tout au long des failles (dites aussi dorsales) océaniques où se forme la nouvelle croûte solide, les plaques s'éloignent, tandis que du côté opposé elles se compriment, sur des zones de subduction, puis se réincorporent au magma. C'est pourquoi l'on enregistre souvent, de part et d'autre de ces lignes, des tremblements de terre, dus à la friction des plaques en compression, et l'on y trouve des volcans qui répandent du magma venant des profondeurs. Le résultat est que les planchers océaniques se renouvellent complètement tous les 200 millions d'années environ.

En étudiant ces processus, les géologues ont recueilli beaucoup d'informations, utilisables dans différents domaines pratiques, notamment pour chercher des sources de matières telles que le charbon et le pétrole, là où il y a le plus de probabilités d'en trouver, ou bien pour projeter avec précaution des travaux d'ingénierie tels que ponts, tunnels, ou barrages. En effet, de grandes catastrophes dues aux tremblements de terre ou aux éruptions volcaniques peuvent avoir moins de conséquences si l'on sait pré-calculer, et prendre en compte, le contexte tectonique et le risque géologique.

Mais cette capacité est récente, puisque la géologie scientifique n'est née qu'au 18^{ème} siècle, et qu'elle n'a été modernisée qu'au 20^{ème} siècle. Même si l'on retrouve dans l'histoire antique quelques observations de phénomènes géologiques, les premières tentatives réussies de leur étude dans un cadre cohérent et approfondi datent du 18^{ème} siècle. Avant cela, et pendant des siècles, des naturalistes et des penseurs, intéressés ou intrigués par les phénomènes géologiques et par leurs effets, s'étaient limités à décrire, par exemple, des éruptions volcaniques, diverses roches, ou des tremblements de terre, et à formuler des hypothèses explicatives, parfois en partie correctes, mais sans pouvoir aller assez loin, parce qu'ils ne disposaient pas encore des connaissances physiques et chimiques suffisantes.

La géologie d'avant le 18^{ème} siècle était donc hétéroclite, puisque tour à tour empirique, descriptive, parfois analytique, mais aussi métaphysique, voire dogmatique, dans certaines explications. En tout état de cause, elle n'existait pas encore comme science autonome, tout comme n'existait pas encore la profession de géologue.

Quand Richard de Bury (1287-1345) utilisait le mot géologie dans son *Philobiblion*, il ne lui attribuait qu'un sens profane de simple science terrestre, en opposition notamment à la théologie, science divine. En cela, la géologie a eu une évolution différente de celle d'autres branches du savoir scientifique comme les mathématiques, science ancienne caractérisée par une application et un objet d'étude ouverts à l'abstraction, ou comme l'astronomie, caractérisée dès le début par une tendance à la spéculation conceptuelle, ou même comme la médecine, qui existait en raison d'un domaine d'intervention sensible universel, la souffrance et la maladie.

Dans le monde antique, une proto-géologie avait effectivement fait ses premiers pas en raison d'exigences pratiques, et assez peu en raison de préoccupations théoriques et savantes. Ses branches les plus utiles se sont développées d'abord, puisque l'hydrologie découlait de la nécessité de prévenir les crues et d'en atténuer les dommages, la minéralogie servait à reconnaître les sites adaptés aux exploitations minières, et la pétrographie se développait parce que les constructions en pierre de grandes dimensions incitaient à chercher les matériaux les mieux adaptés.

Certains travaux présentaient néanmoins parfois un intérêt et une portée à caractère plus scientifique. En se basant sur la présence de fossiles dans les roches sédimentaires, les savants grecs anciens Anaximandre (610-546 avJC), Xénophon (430-355 avJC), Xénocrate (396-314 avJC) et d'autres, avaient formulé l'hypothèse selon laquelle il y aurait eu dans le passé des transgressions et des régressions marines.

Hérodote (484-430 avJC), après un long voyage en Égypte, avait conclu avec juste raison en 450 avJC que le delta du Nil, et l'Égypte elle-même, s'étaient formés sur une très longue durée, parce que chaque crue y abandonnait une fine couche de sédiments. C'est également Hérodote qui avait proposé le mot delta, en remarquant que la zone où le fleuve débouchait dans la mer semblait triangulaire, comme la lettre grecque majuscule du même phonème.

Plus scientifiquement, Aristote (384-322 avJC), Théophraste (372-287 avJC) et Aristarque de Samos (310-230 avJC) avaient évoqué la sphéricité de la Terre, tandis que Dicéarque (4^{ème}- 3^{ème} siècle avJC), Ératosthène (276-194 avJC), et Eudoxe de Cnide (400-347 avJC) en avaient estimé les dimensions, et que Parménide (5^{ème} siècle avJC) y avait tracé des zones climatiques. Pythéas (4^{ème} siècle avJC) avait relié les marées aux positions de la Lune, et Straton de Lampsaque (328-270 avJC) avait formulé des hypothèses logiques sur la dynamique des systèmes fluviaux.

Il a notamment écrit que la mer n'avait pas de pentes en surface, une affirmation chargée d'importantes implications géologiques et théologiques (mais pas si évidente que ça jusqu'à la fin du 17^{ème} siècle).

Chez les Romains, ensuite, Pline l'Ancien (23-79), avant de mourir étouffé par les cendres du Vésuve lors de l'éruption de 79 qui détruisit Pompéi et Herculaneum, avait décrit des minéraux et des roches dans sa monumentale *Historia naturalis*, en insistant particulièrement sur ceux qui permettaient des applications techniques, comme les argiles, les marbres, et les gemmes, lesquels ont donc occupé un premier espace important dans le classement des connaissances géologiques.

Après une éclipse lors du Moyen Âge européen, des études et des observations géologiques reprirent, avec des incidences indirectes. En effet, les voyages par mer permettaient le développement d'études des fonds côtiers, reportées notamment dans l'Atlas Catalan de 1375, le guide alors le plus précieux pour la navigation, contenant des indications précises sur les marées et les fonds rocheux. L'analyse de ces fonds poussa en 1517 le médecin Girolamo Fracastoro (1478-1553), dans une lettre adressée au jurisconsulte véronais Torello Saraina sur le lien entre le Déluge et les fossiles observés, à déclarer que ces derniers ne pouvaient pas être issus d'un événement tel que le Déluge, puisqu'on ne trouvait pas de fossiles de poissons d'eau douce à l'intérieur des roches étudiées.

Au 17^{ème} siècle, ensuite, la géologie avait accompli quelques autres avancées partielles, puisque ce siècle s'est achevé avec de nouvelles découvertes, incluant la proposition de modèles et de théories, qui d'une façon ou d'une autre ont amorcé le débat scientifique du siècle suivant. Le terme de géologie a été timidement introduit dans une intention innovante par Ulisse Aldrovandi (1522-1605) en 1603, mais pendant encore près de deux siècles, le terme le plus usité est resté oryctologie (du grec orissein, creuser).

Des bases scientifiques de paléontologie et de sédimentologie ont ensuite été ajoutées, et renforcées par l'œuvre d'artistes et d'érudits comme Agostino Scilla (1629-1700), qui fit des observations plutôt correctes sur la sédimentation dans le détroit de Messine, reconnu l'origine des fossiles plio-pléistocéniques, et étudia le mouvement des vagues de la mer Tyrrhénienne. Bernardino Ramazzini (1633-1714) avança l'idée que la plaine du Pô était le lit alluvionnaire ancien du Pô. Ailleurs, les Anglais Martin Lister et Edward Lhuyd analysaient des fossiles et anticipaient les principes de la stratigraphie, qui seront par la suite ordonnés de façon plus systématique par Nicolas Sténon.

Johannes Kepler (1571-1630), dans son *Astronomie*, expliquait les marées par l'attraction gravitationnelle de la Lune, thèse confirmée par Galilée, mais contestée par Descartes. De son côté, William Gilbert (1544-1603) publiait le *De Magnete*, dans lequel il affirmait que la Terre agissait elle-même comme un immense aimant ayant deux pôles opposés, dont le champ magnétique influençait les aiguilles des boussoles. D'intéressantes contributions.

D'autres érudits amélioraient leur connaissance de la géothermie par la lecture d'anciens écrits grecs et latins. Exploitant cela, Athanasius Kircher (1602-1680), dans son *Mundus subterraneus* de 1665, vérifia l'augmentation de la température en fonction de la profondeur, et il proposa un modèle de l'intérieur de la Terre. Selon son analyse, existerait un grand feu au centre, et des ramifications se dirigeraient vers les bouches superficielles des volcans, tandis que l'eau, contenue dans de grandes cavités, arriverait aux océans à travers des fractures et des fissures. C'était une représentation usuelle dans la plupart des cosmogonies de la Renaissance, où le globe terrestre était représenté comme constellé de cavernes qui contenaient de l'eau, de l'air et du feu. Et cet ensemble était supposé provenir du recyclage de minéraux et de résidus d'une terre primordiale.

A travers l'œuvre de Haüy et de Mohs, la minéralogie s'affranchit ensuite de ces représentations rudimentaires, et elle prit des caractéristiques plus modernes, aussi bien dans la systématique que dans l'étude physique objective des minéraux, qui n'était alors plus seulement basée sur la couleur et les propriétés thaumaturgiques. Pour sa part, la géographie stratigraphique trouva une base dans l'œuvre de Giovanni Arduino (1714-1795), géologue inventeur de la terminologie Primaire, Secondaire, Tertiaire et Quaternaire, utilisée ensuite jusqu'à l'époque moderne pour la division des temps géologiques.

Au siècle précédent, Niels Steensen (1638-1686), plus connu sous le pseudonyme de Nicolas Sténon, avait été considéré lui aussi comme l'un des premiers maîtres de la géologie. Danois de naissance, il s'installa en Italie, où il resta longtemps à la cour des Médicis, comme anatomiste et géologue, avant de prononcer ses vœux et de choisir une vie ecclésiastique. Parmi ses observations les plus significatives, on retient surtout celle sur la constance de l'angle entre les faces des minéraux, qui fut prouvée expérimentalement, puis codifiée dans une loi de la cristallographie, connue encore aujourd'hui comme loi de Sténon. On y trouve aussi la formulation des principes qui régissent les processus de sédimentation. Théorisés en 1669, ils sont connus en tant que principe de l'horizontalité originelle, principe de la superposition, et principe de la continuité latérale originelle.

Au 18^{ème} siècle eurent lieu des discussions très vives sur la formation des reliefs montagneux et des roches, entre lesquels on ne faisait pas encore assez de distinction. On se demandait plutôt dans quelle mesure le feu et l'eau en étaient responsables. C'est ainsi que dans ce débat, les géologues qui penchaient pour l'intervention de l'eau ont été appelés neptunistes (de Neptune, dieu romain de la Mer), et les autres ont été appelés plutonistes (de Pluton, dieu des Enfers et du feu tellurique).

Dans la proposition neptuniste, les montagnes se seraient formées à la suite d'une série de dépôts dans un océan immense qui recouvrait jadis toute la Terre. Même les couches inclinées ou plissées y étaient expliquées par le fait qu'elles s'étaient déposées en épousant l'inclinaison des surfaces préexistantes, comme lorsqu'une solution précipite non seulement sur le fond du récipient, mais également sur ses côtés.

Abraham Gottlob Werner (1749-1817), de l'École des mines de Freiberg, l'initiateur du neptunisme, était connu pour avoir étayé son argumentation par des observations qu'il avait menées lui-même dans les zones minières allemandes.

Werner déclarait que l'âge de la Terre était beaucoup plus important que celui qui était donné par la Bible, et que les formations géologiques se disposaient de façon ordonnée en strates superposées, déposées graduellement. Selon Werner, la masse primordiale de la Terre aurait été submergée par un océan gigantesque à partir duquel se seraient formés au fur et à mesure, par sédimentation, tous les types de roches, granits et basaltes compris.

Dans cette vision, les chaînes des montagnes et les bassins de sédimentation étaient déjà existants, et par conséquent les couches s'y déposaient naturellement inclinées et plissées. Horace Bénédict de Saussure (1740-1799), un autre neptuniste, armé d'un marteau et à dos de mulet, réalisa en 1796 une exploration de toutes les cimes accessibles des Alpes, au terme de laquelle il rédigea *Voyages dans les Alpes*, la première étude moderne de géologie régionale, qui ne prouvait pas pour autant les affirmations neptunistes.

C'est pourquoi d'autres savants contestaient les idées des neptunistes en considérant qu'elles n'expliquaient pas de façon satisfaisante tous les phénomènes géologiques. En particulier, l'existence des volcans et des roches volcaniques justifiait un courant de pensée selon lequel beaucoup de roches semblaient d'origine ignée, c'est-à-dire provoquées par la chaleur interne de la Terre, et ne devaient donc pas être rattachées à des processus de sédimentation.

Un plutoniste éminent, Jean-Étienne Guettard (1715-1786) présenta en 1752 à l'Académie royale des sciences de Paris un mémoire sur quelques montagnes de France qui avaient été volcans, en soutenant l'origine volcanique des roches basaltiques. Bien qu'ignoré pendant des décennies, Guettard doit être considéré comme le fondateur de la géologie stratigraphique moderne. Il a été aussi parmi les premiers à dessiner des cartes géologiques, tout en menant des recherches de minéralogie et de géographie physique, et en étant l'initiateur de la paléontologie en France.

Au 18^{ème} siècle, d'autres recherches qui contredisaient le mythe du Déluge, maintenu par la prégnance de la religiosité chrétienne, ont connu une nouvelle vigueur. On avait découvert dans des bibliothèques assyro-babyloniennes des récits mentionnant des déluges immémoriaux, desquels le déluge biblique de Noé pouvait s'inspirer, puisqu'un très ancien habitant mythique de la Mésopotamie, Hasisi-Hadra, aurait construit un navire pour s'y réfugier durant les sept jours et les sept nuits du déluge de son époque.

Certains géologues ont profité du débat pour introduire l'idée que le déluge en question résulterait plutôt d'un violent séisme qui aurait permis alors à la mer d'envahir les terres de la basse Mésopotamie et d'y détruire villes, champs et cultures. Mais aux 17^{ème} et 18^{ème} siècles, les modèles abrahamiques de la genèse de la Terre, inspirés ou non d'événements catastrophiques mythiques analogues, étaient encore dominants, et ils imposaient une argumentation sur la base de ce que l'on considérait comme l'âge officiel de la Terre (quelques milliers d'années seulement selon la Bible). Un recalcul très antérieur de l'âge de la Terre contredisait donc les mythes abrahamiques de la genèse planétaire, concernant notamment les phénomènes de formation des montagnes et des mers.

Tant que le catastrophisme religieux mythique prévalait, la durée et les causes des phénomènes telluriques nouvellement découverts ne pouvaient donc pas encore sans risques être mis en contradiction avec les dogmes dominants. La plupart des savants, craignant la réaction religieuse publique de leur époque, ne voulaient pas attribuer plus de 9.000 ans à la Terre.

Mais tout ceci commença à changer avec les premières tentatives de Georges Leclerc de Buffon (1707-1788), qui osa une estimation de 100.000 ans. Plus tard, Lord Kelvin (1824-1907) renchérit en proposant que la Terre puisse avoir entre 100 et 200 millions d'années. Mais ce n'est qu'au tout début du 20^{ème} siècle, grâce aux techniques radio-isotopiques, qu'on a enfin obtenu des éléments assez probants pour dater de manière plus réaliste l'âge de la Terre, à plus de 5 milliards d'années.

Jusqu'alors, le catastrophisme et la superstition avaient borné l'imagination officielle. Dans son *Telluris theoria sacra*, publié en 1681 en latin puis en anglais et qui connut une grande popularité, le théologiste anglican Thomas Burnet avait proposé un modèle d'histoire de la Terre où tout était expliqué par l'eau et le feu, et où l'on trouvait même des prévisions sur un futur nouveau déluge. Pour sa part, dans *New Theory of the Earth*, William Whiston (1667-1752) supposait que la rotation de la Terre aurait commencé à la suite d'une collision avec la queue d'une comète.

En 1812, dans le même esprit, avaient été publiées les *Recherches sur les ossements fossiles des quadrupèdes*, du Français Georges Cuvier (1769-1832), une figure célèbre parmi les catastrophistes, éminent paléontologue, et expert d'anatomie comparée. Au premier volume de son *Discours préliminaire*, Cuvier soutenait que des incursions et des retraits répétés de la mer, violents et soudains, avaient caractérisé l'évolution de la vie sur Terre. Des groupes entiers d'animaux auraient ainsi été tués en masse par la succession de ces catastrophes, et les mammoths congelés, parfaitement conservés (pourvus de viande, de poil et de défenses), trouvés dans les glaces de Sibérie, témoignaient de la soudaineté de ces événements.

Les espèces naturelles étaient considérées comme fixes et immuables dans l'œuvre de Cuvier, qui s'opposait à toute relation entre fossiles, animaux actuels, et changements adaptatifs dans la nature. Pour lui, les strates inclinées et le soulèvement des montagnes étaient dus à des événements catastrophiques. Les inondations successives étaient une autre preuve, conforme au Déluge biblique, du caractère cyclique et de l'existence de ces catastrophes. En d'autres termes, il cherchait lui aussi à démontrer que les données géologiques s'accordaient avec le mythe religieux du Déluge.

Mais quand il devint trop évident que la Terre devait avoir -au moins- plusieurs centaines de millions d'années, les théories catastrophiques furent progressivement suspectées, puis délaissées. Et dans ce contexte de dépassement du paradigme catastrophiste, a pu prospérer un courant de pensée opposé, appelé actualisme. Au-delà de l'âge effectif de la Terre, les tenants de ce modèle étaient convaincus que les changements géologiques étaient guidés par un lent gradualisme.

Robert Hooke (1635-1702), expérimentateur de la Royal Society, estimait que les processus actifs à la surface de la Terre étaient le fruit de changements successifs qui avaient toujours été en cours et qui avaient placé les mers à la place des montagnes et inversement.

Dans son *Discours of Earthquakes* de 1668, il soulignait que des tremblements de terre et des déplacements de l'axe de rotation de la Terre pouvaient avoir eu lieu souvent, depuis un lointain passé, et que la durée du jour était peut-être différente, il y a très longtemps.

Une argumentation encore plus décisive contre le catastrophisme fut apportée au 18^{ème} siècle par James Hutton. Ce gentilhomme écossais (1726-1797) exposa ses idées dans son livre *Theory of the Earth with Proof and Illustration*, présenté à la Royal Society d'Edimbourg en 1785. Contre l'idée d'une Terre statique créée par fait divin moins de 10.000 ans avant, comme la voyaient encore ses contemporains, Hutton expliqua que, sur une beaucoup plus longue période, des processus à action lente et continue, comme l'érosion, pouvaient conduire à de grandes modifications.

Dans son ouvrage, ce savant soulignait que l'eau et l'air attaquaient et désintégraient en permanence les roches, et que ce processus de dégradation produisait des détritits, sous forme de graviers, de sables et de boues, qui par la suite étaient transportés par les flux d'eau et d'air, pour finir à proximité ou au-dessous du niveau de la mer. De cette façon, selon Hutton, se formaient des dépôts, qui avec le temps se condensaient et se cimentaient pour devenir des roches sédimentaires.

Le savant écossais identifia ensuite une autre force très active mue par la chaleur interne de la Terre, et qui, par un phénomène d'expansion thermique, provoquait des remontées de matière chaude, c'est-à-dire des intrusions ignées, et par conséquent, un véritable soulèvement et une déformation des sédiments, en plis et en failles. Le résultat final était la formation de reliefs par un processus dit d'orogénèse.

Dans le cas des sédiments marins, ces transformations se terminaient par la formation de terre ferme, mais celle-ci subissait par la suite des phénomènes érosifs, donnant lieu à de nouveaux cycles de transformations. Le processus d'érosion-transport-dépôt fut considérée par Hutton comme permanent, ce qui le porta à formuler un principe fondamental de la géologie moderne, appelé principe de l'actualisme, ou de l'uniformisme, selon lequel il est possible de reconstruire le passé de la Terre sur la base d'observations actualisées, parce que les forces de transformation restaient les mêmes depuis l'aube des temps.

Ces idées fondamentales ont été reprises au 19^{ème} siècle par Charles Lyell (1797-1875), qui, entre 1830 et 1833, publia les trois volumes de ses *Principles of Geology*.

Après des études de droit, Lyell avait décidé de se consacrer plutôt à sa véritable passion, les sciences naturelles. Pour ce faire, il entreprit une série de voyages, d'abord en Angleterre, puis en France et en Italie, où il visita particulièrement la Sicile. De ces voyages et de ses observations, Lyell tira les éléments essentiels de sa théorie sur l'actualisme. Selon lui, les lois physiques qui régissaient les phénomènes terrestres étaient immuables et constantes. Il affirma que sa confiance dans les observations géologiques scientifiques, et sa découverte de l'histoire réelle de la Terre, s'appuyaient sur la confiance qu'on peut avoir dans la constance de ces lois naturelles. Le fait qu'elles soient immuables et constantes lui permettait donc de raisonner de manière certaine par analogie.

Sur la base de cette conception de la nature, Lyell put contester certaines théories admises depuis de nombreuses années, dont celle du refroidissement de la Terre. En effet, il n'y avait pas de preuves que l'activité volcanique ait été par le passé plus intense qu'à son époque, et les pauses apparemment très longues entre les périodes d'activité de certains volcans s'expliquaient parce que l'échelle réelle du temps n'était pas transposable dans le ressenti intuitif du rythme de l'évolution naturelle de la Terre. Les théories catastrophistes reçurent un coup fatal lors de la publication des *Principes* de Lyell, et beaucoup de tenants du Déluge et autres catastrophes mythiques se convertirent à l'actualisme. C'est en partie pour cette raison, et pour l'importance qu'il attribua aux observations faites sur le terrain, que Lyell a été considéré comme un co-fondateur de la géologie moderne.

Finalement, vers la fin du 19^{ème} siècle, la vivacité et l'intérêt du débat scientifique concernant la géologie ont abouti à la création d'un Congrès géologique international, dont la première session s'est tenue à Paris en 1880, et dont le but était d'améliorer l'activité de la recherche scientifique en la matière, à travers une coordination et des échanges permanents. Même au niveau politique et économique, on devenait de plus en plus officiellement convaincu de l'utilité des reconnaissances cartographiques détaillées des ressources géologiques et minérales. En 1873, un Comité géologique d'État entreprit en Italie le relevé géologique de la Sicile, et continua par l'édition d'une carte géologique à 1/100.000 de tout le territoire national.

En 1879, naquit aux États-Unis le Geological Survey, et d'autres initiatives de ce genre furent prises en quelques années par les principaux pays, en vue de se doter d'une documentation géologique nationale. Au cours de la deuxième moitié de ce siècle, l'intérêt pour les recherches et les études scientifiques géologiques a été particulièrement productif, G.J. Poulett-Scrope publiant notamment un ouvrage qui décrivait tous les volcans actifs connus.

Une autre avancée notable résulta de la campagne d'exploration du navire Challenger (1872 à 1876) qui inaugurait une recherche océanographique ambitieuse. Le navire parcourut les océans en bouclant un périple de 69.000 milles nautiques, et en accumulant 600 caisses d'échantillons en tous genres. Parmi les travaux scientifiques qui en ont découlé, publiés en cinquante volumes, figuraient une reconnaissance de la température des eaux profondes, la définition de la loi de la composition constante de l'eau de mer, et la découverte de la dorsale océanique atlantique.

Ailleurs, se poursuivaient d'autres recherches sur les mouvements de la croûte terrestre. En 1889, C.E. Dutton introduisit le terme d'isostasie, pour caractériser l'équilibre qui intervient à une certaine profondeur entre des éléments de la croûte terrestre d'épaisseur ou de densité différentes. Peu avant, de 1883 à 1888, Eduard Suess avait publié le traité *Das Antlitz der Erde* (la Face de la Terre), dans lequel il soulignait l'importance des mouvements horizontaux de la croûte pour la formation des chaînes montagneuses. Il formulait l'hypothèse selon laquelle la Terre était formée de trois enveloppes constituées de sial, sima et nife, c'est-à-dire caractérisées respectivement par leurs teneurs en silicium et en aluminium, ou en silicium et en magnésium, ou en nickel et en fer.

Dans les premières années du siècle suivant, intervinrent une distinction et une collaboration entre géophysique et géochimie, et en 1908, F.G. Clarke compila dans *The Data of Geochemistry* les analyses chimiques effectuées sur des roches dans les laboratoires du US Geological Survey. Ce recueil, régulièrement mis à jour, constitua dès lors une source importante de données géochimiques. Entre-temps, d'autres progrès avaient lieu : la construction des premiers sismographes, qui permettaient de quantifier les phases d'un tremblement de terre, la mise au point de l'échelle de Mercalli-Cancani, l'éclaircissement de la nature différente des ondes sismiques, l'identification par Andrija Mohorovicic (1857-1936), de la discontinuité de consistance entre le manteau et la croûte terrestre, phénomène appelé encore aujourd'hui Moho en référence à son nom.

Dans les premières décennies du 20^{ème} siècle, on commença à considérer l'idée d'une dérive des continents, en particulier grâce à Alfred Wegener (1880-1930), qui formula une hypothèse convaincante, reprise et adaptée par la théorie de la tectonique des plaques. En outre, de nouveaux instruments et de nouvelles techniques de recherche comme l'échosondeur à ultrasons, le gravimètre et le sismographe, rendirent possible une prospection de plus en plus précise des sous-sols, y compris océaniques.

Ce qui a permis aussi bien une identification pratique de gisements de pétrole au moyen de mesures gravimétriques, qu'une découverte de l'hétérogénéité des fonds océaniques, et de la composition des entrailles géologiques profondes de la Terre. Dans les années 1950, C.F. Richter (1900-1985) et B. Gutenberg (1889-1960) relièrent la sismicité et le volcanisme en présentant de nouvelles analyses des forces et de la composition de l'intérieur de la masse chaude planétaire.

Avec tout cela, pendant l'Année géophysique internationale de juillet 1957 à août 1958, ont pu être exposés les résultats d'études menées dans plus de soixante-dix pays, où les orientations des recherches étaient harmonisées avec celles d'autres domaines scientifiques complémentaires.

Un nouveau cadre conceptuel a ensuite été ajouté dans les années 1960, grâce en particulier à John Tuzo Wilson (1908-1993), inventeur de la notion de faille transformante, qui révolutionnera la géologie. Et finalement, la théorie devenue assez mature de la tectonique des plaques s'est affirmée comme le principal modèle de référence pour les décennies suivantes.

Un débat connexe a malgré tout fait émerger d'un côté une opposition à cette théorie, opposition basée sur une résurgence temporaire du catastrophisme, et d'un autre côté, de nouvelles hypothèses sur certains processus évolutifs liés, géologiques et biologiques.

Il a fallu clarifier cela, puisque par exemple, en paléontologie, des extinctions de masse ayant eu lieu dans le passé étaient explicables sur la base d'événements discontinus tels que, par exemple, des changements climatiques soudains ou l'impact de météorites. Mais ces hypothèses logiques ne pouvaient pas appuyer le catastrophisme, puisqu'elles confirmaient en fait des analyses contredisant le catastrophisme mythique antérieur.

Par ailleurs, en ce qui concerne la théorie de la dérive des continents, certains chercheurs ont soutenu que le processus de réabsorption de la croûte terrestre dans les fosses océaniques n'était peut-être pas équilibré par une émission égale de matière en fusion issue des failles. Selon eux, au contraire, l'émission continue excessive de croûte océanique nouvelle sortant des dorsales océaniques produisait une augmentation continue du volume de la Terre.

Cette théorie, qui induisait une hypothétique expansion-décompression terrestre, a été critiquée dans la mesure où elle impliquait une expansion non compensée, et non mesurée comme telle, des fonds océaniques, contredisant les principes de la tectonique mesurable des plaques.

Dans cette hypothèse, que peu de preuves venaient conforter, mais qui a alimenté un débat animé, la rotation terrestre était sous-évaluée parce qu'on la considérait comme une force relativement faible. Or, cette force pourrait peut-être influencer tout de même sur le comportement de la surface terrestre, et par voie de conséquence sur l'évolution écologique et phénoménologique de la planète.

En d'autres termes, un tel renouvellement non compensé de la croûte terrestre induirait que la Terre n'aurait pas seulement changé de forme, mais aussi de dimensions dans le temps, se dilatant et se contractant en outre sous l'effet de conjonctions cosmiques périodiques et de fluctuations de gravité, thèses déjà soutenue en partie en 1937 par l'un des maîtres de la géologie, Samuel Carey (1911-2002), qui fut le premier à formuler l'hypothèse d'une Terre en gonflement.

Des recherches futures permettront éventuellement de trancher ce débat, mais en attendant, mieux vaut s'en tenir aux recherches les plus pertinentes, et les plus utiles pour la bonne gestion de notre biome terrestre, qui faute de preuves suffisantes ne prennent pas en compte cette hypothèse.



Un super-continent appelé Pangée occupait toute la surface émergée terrestre il y a 250 millions d'années (Permien).

LES OCÉANS, L'HYDROSPHERE

Si on l'observe depuis l'espace, notre planète d'origine apparaît presque toute blanche et bleue. Elle est blanche du fait des nuages qui l'enveloppent, et bleue du fait des mers et des océans, puisque l'atmosphère disperse d'abord les longueurs d'ondes les plus courtes de la lumière solaire, donc le bleu, et que la mer reflète cette couleur dominante.

Les masses liquides, qui occupent 71 % de la surface planétaire, peuvent la recouvrir sur plus de 11 km de profondeur. Ces masses ne sont pas immobiles ; en s'en approchant, on les voit agitées sous l'effet des vents et du Soleil. Les vents agitent la surface, en produisant des vagues, et en poussant des courants sur des milliers de kilomètres, tandis que la chaleur du Soleil y impulse en outre des mouvements de brassage en profondeur.

La circulation incessante de ces courants marins a des effets importants sur le climat planétaire. La réserve d'eau océane possède une grande capacité thermodynamique, c'est-à-dire qu'elle absorbe une grande quantité d'énergie pour se réchauffer, puis une fois réchauffée, elle répartit cette énergie à longue distance par plusieurs courants, qui exercent une forte influence sur le climat planétaire. Les courants chauds, comme le Gulf Stream, recueillent la chaleur des tropiques et la restituent dans les zones plus froides ; et les courants froids ont un circuit et un effet en sens inverse.

Au début de son histoire, quand la Terre n'avait ni océans ni atmosphère, sa chaleur endogène avait provoqué l'évaporation de gaz tels que l'azote, le gaz carbonique, et surtout la vapeur d'eau, mélangés et progressivement accumulés jusqu'à constituer une épaisse couche retenue par la force de gravité. La vapeur d'eau s'est ensuite condensée, jusqu'à constituer l'importante masse océanique actuelle. Est-ce que le même processus aurait pu avoir lieu sur d'autres planètes de notre système solaire ? Probablement pas. Sur les planètes situées entre la Terre et le Soleil, la gravité n'était pas assez forte pour retenir et condenser les gaz légers et pour empêcher certains de se disperser dans l'espace. Et sur les planètes externes, les températures sont si basses que l'eau y reste séquestrée en glace.

Il ressort donc des connaissances dont nous disposons que la Terre est la seule planète du Système solaire où l'eau a pu être (et rester) suffisamment disponible en trois états différents : solide, liquide et gazeux.

Il faut cependant préciser que cette eau disponible n'est pas seulement contenue dans sa masse océanique. En permanence, des millions de tonnes d'eau s'évaporent et recirculent sous forme de vapeur, puis de pluie, dont des milliards de gouttes martèlent le sol, le remuant et le modelant. Ensuite, la force de gravité réunit cette eau d'aspersion, qui ruisselle, forme des torrents, des fleuves, des lacs, et retourne tôt ou tard dans la masse océanique.

Lorsque cette eau atteint la croûte terrestre émergée, une partie s'y enfonce et y forme des réserves liquides souterraines. Une autre partie s'évapore dans l'air, et une autre partie est absorbée par les plantes, d'où elle s'évapore de nouveau à travers les feuilles. Ce cycle est permanent, et permet d'entretenir des réserves annexes, notamment dans des glaciers, dont les masses gelées se déplacent et se renouvellent très lentement. De nos jours, les glaciers se situent dans les zones de montagnes et dans les régions polaires, mais pendant les dernières ères glaciaires, la plus grande partie de l'Amérique du Nord, de l'Europe, de l'Asie et de l'Afrique du Sud était couverte de glaciers et de plaques gelées. Le niveau des océans variait selon l'importance des réserves ainsi immobilisées.

La plupart de ces phénomènes ont été pris en compte et étudiés par la science de l'océanographie, dont la création a répondu à des nécessités surtout pratiques, particulièrement liées au réseau des relations commerciales et des communications que les premières civilisations ont commencé à tisser dès les époques les plus reculées. Dès lors, des marins ont essayé d'accumuler des informations sur la mer et sur les caractéristiques des régions qu'ils visitaient le plus fréquemment, pour pouvoir y voyager plus en sécurité, et aussi rapidement que possible.

Au fil des époques, leurs connaissances se sont améliorées, mais la formation des marins a longtemps reposé sur une expérience pratique, par apprentissage sur les bateaux, une dure épreuve qui pénalisait les erreurs. Puisqu'ils avaient besoin de moyens et de savoirs aussi efficaces que possible, des savants les ont aidés à améliorer leurs savoirs empiriques, en commençant par replacer ces savoirs épars dans un ensemble aussi cohérent que possible, utilisant des cartes et des calculs mathématiques.

La carte descriptive et exploitable la plus ancienne que l'on connaisse remonte à Ératosthène de Cyrène (276-194 avJC.), et dispose déjà d'une grille comme sur les cartes modernes dotées de longitude et de latitude.

Ératosthène avait calculé la circonférence de la Terre de façon ingénieuse, en se fondant sur l'observations de la longueur des ombres portées à Alexandrie, et au niveau du tropique du Cancer, le jour du solstice d'été. La mesure qu'il obtint, 43.000 km, est étonnamment proche de la mesure moderne vérifiée (40.075 km).

Par la suite, Claude Ptolémée, au 2^{ème} siècle, produisit une carte améliorée du monde alors connu, mais où il utilisa de façon erronée une valeur de la circonférence terrestre égale à 37.000 km. Une erreur qui devait avoir des conséquences importantes, car les voyageurs du 16^{ème} siècle, parmi lesquels Christophe Colomb, se fièrent au travail et aux estimations de Ptolémée, alors revalorisés par les savants de la Renaissance. Ils calculaient des valeurs basées sur une dimension de la Terre qui était inférieure à sa taille réelle. Cette erreur fut corrigée au 17^{ème} siècle.

En même temps que des documents cartographiques, étaient rédigés des livres spéciaux contenant des informations pratiques sur les courants et sur les distances, exprimées en jours de navigation entre les différents ports. Ces informations ont fourni une masse de données qui ont permis bien plus tard à l'officier de la Marine militaire américaine Matthew Maury de rédiger, en 1847, un premier atlas des courants océaniques.

D'autres séries d'informations, rapportant la profondeur et la nature des fonds, le profil et le dessin de la côte, les expositions des baies aux vents et aux vagues, étaient recueillies aussi par les navigateurs, et facilitaient l'accès aux principaux lieux d'accostage. Ces informations complémentaires importantes étaient reportées dans des livres appelés portulans, qui permettaient aux navigateurs d'éviter les pièges des écueils affleurants, et des positions dangereuses dans les mouillages.

Cartes et portulans connurent un grand développement depuis le 16^{ème} siècle du fait de la multiplication des explorations océaniques. La trajectoire du bateau mesurée par rapport à la carte donnait une information utile aux navigateurs, car cela indiquait la dérive due au vent, et l'effet des courants océaniques qu'ils rencontraient. Mais les navigateurs d'alors, tout en reconnaissant l'effet et l'importance de ces courants, ne pouvaient pas encore en mesurer assez la vitesse et la direction.

Leur route restait approximative. Sans chronomètres précis pour mesurer la longitude, dont l'utilisation ne devait devenir régulière qu'au 19^{ème} siècle, ils ne pouvaient déterminer leur position qu'en se fondant sur celle du Soleil, c'est-à-dire en mesurant uniquement la latitude, et en la croisant avec une valeur approximative de la direction et de la distance parcourue.

Or, la dérive produite par les grands courants océaniques était forte, notamment celle du grand courant nord-équatorial allant de l'Afrique vers les Amériques, identifié et signalé par Christophe Colomb au cours de son troisième voyage. Ailleurs, à la même époque, des navigateurs portugais découvraient et cherchaient à exploiter le courant des Aiguilles en Afrique orientale. Dans le Pacifique, l'existence du Kuroshio, un courant qui portait au nord puis au nord-est le long des côtes du Japon et de la Sibérie jusqu'en Amérique du Nord, était connu des pilotes espagnols des galions qui assuraient la liaison entre leurs colonies des Philippines et du Mexique.

Ces courants influençaient évidemment sur les routes choisies par les navires selon leur destination. Par exemple, le galion espagnol qui reliait Manille au Mexique chaque année, suivait des routes différentes à l'aller et au retour. À l'aller, vers Manille, il suivait la route équatoriale, en cherchant à exploiter le courant pacifique nord-équatorial qui allait vers l'Asie, mais au retour il cherchait à suivre le Kuroshio, et donc il remontait très au nord, le long des côtes de la Sibérie, puis il redescendait toute l'Amérique du Nord jusqu'au Mexique.

Si on survivait aux tempêtes, aux maladies et aux erreurs de direction, cet aller-retour durait deux ans. De la même façon, le parcours le plus rapide entre l'Europe et l'Afrique méridionale ne consistait pas à suivre les côtes africaines, où les vents et les courants allaient en sens contraire, mais à traverser l'Atlantique vers le Brésil, et à descendre le long des côtes argentines, jusqu'à rencontrer le courant Circumpolaire antarctique, qui décrivait un grand anneau autour du continent antarctique, ce qui facilitait un passage rapide vers le Cap de Bonne-Espérance. Pendant de nombreux siècles, les informations recueillies dans les portulans représentèrent presque toutes les connaissances pratiques de l'océanographie.

Puis un nouveau développement océanographique s'amorça, suite aux trois grands voyages du capitaine James Cook, accomplis dans le Pacifique entre 1768 et 1779. Lors de ces voyages, les navires de Cook avaient à bord des chronomètres qui permettaient de calculer avec une meilleure précision la longitude, et donc d'améliorer la position relevée. La connaissance plus fiable de la position géographique permettait aussi une meilleure estimation de l'effet de dérive des courants. La publication du compte rendu des voyages de Cook contribua fortement à élargir l'horizon culturel et pratique européen, et à vulgariser la connaissance des conditions de déplacement sur les océans, où les principales nations européennes de l'époque organisèrent alors davantage de voyages d'exploration, parfois en commun.

Napoléon I^{er} envoya deux navires français, Le Géographe et Le Naturaliste, qui eurent des échanges avec des expéditions russes, danoises et britanniques. Les savants embarqués étaient souvent des médecins polyvalents, préparés intellectuellement à toutes les découvertes. Sur place, pendant que différentes notions géographiques étaient consolidées, un grand nombre d'échantillons géologiques et biologiques étaient recueillis. Et progressivement, la mer commença à intéresser en outre d'éminents physiiciens et chimistes. La première analyse de l'eau marine fut publiée par le chimiste français Antoine-Laurent de Lavoisier en 1776, tandis que Pierre-Simon de Laplace élaborait une théorie des marées en se fondant sur les résultats de Newton. Pour sa part, James Rennel réalisa une première synthèse des courants atlantiques en 1832.

Au milieu du 19^{ème} siècle, il y avait donc une communauté de scientifiques qui savaient que les océans constituaient un système interactif d'une grande richesse, avec des constituants physiques, chimiques et biologiques particulièrement complexes. De nouveaux instruments de mesure et d'analyse furent progressivement installés sur des navires de recherche, tandis que des gouvernements appréciaient l'intérêt que les informations recueillies lors des campagnes d'explorations océaniques représentaient sur l'échiquier politique et stratégique mondial. Un nouveau domaine scientifique était prêt à s'organiser avec de tels buts et moyens.

Et le développement industriel lui donna une importance accrue. Lorsque l'essor du télégraphe conduisit à poser des câbles transocéaniques, les opérateurs ont eu besoin d'aide pour connaître la profondeur et la nature des fonds, et y choisir de bons tracés. Un renforcement significatif de l'océanographie résulta de cette combinaison d'intérêts, et le domaine commença à se structurer comme une science. L'usage du mot océanographie se répandit. Dans un dictionnaire français de 1878, on le trouvait encore défini simplement comme une description de l'océan, mais en Allemagne on commençait à utiliser le terme de thalassographie, et à la fin du siècle, l'usage du terme océanographie était devenu courant. En Russie, on utilisait le terme d'océanologie. Quant aux États-Unis, l'océanographie y fut liée au développement du pays, et fortement conditionnée par le climat de frontière prédominant encore au 19^{ème} siècle ; les océans y devinrent un prolongement de leur expansion territoriale, une sorte de frontière supplémentaire, qu'il fallait aussi explorer et décrire.

C'est ainsi que fut institué aux USA un service de cartographie des eaux côtières, qui traitait aussi des voies d'eau intérieures, tandis que la haute mer était confiée à la Marine, qui institua un "Dépôt légal des cartes".