

Union rationaliste
14 rue de l'école polytechnique
75005 Paris
Union.rationaliste@wanadoo.fr

27 avril 2013

Pour une culture générale scientifique

La culture scientifique est trop souvent considérée comme une somme de savoirs spécialisés – chacun en développement accéléré – qui ne sauraient s'intégrer dans la culture, généraliste par nature. Ce document a été élaboré par le groupe de travail mis en place à l'initiative de l'Union rationaliste pour préciser, dans le contexte actuel, la notion de culture scientifique et faire des propositions concrètes pour son développement.

Introduction : Constat, objectifs et présentation	3
Première partie	
– Des principes et des méthodes	7
– Une histoire de l'Univers et de la vie	11
Deuxième partie	
– Des savoirs pour une culture générale	15

Voir page 2 la composition du groupe de travail

Le présent document 'Pour une culture générale scientifique' a été rédigé par Jacques Haissinski, Hélène Langevin-Joliot et Michel Morange,

avec les contributions apportées par les autres membres du groupe de travail : Katia Allégraud, Jean-Pierre Aubin, Marcel Bohy, Thierry Corn, Dominique Dubaux, Gabriel Gohau, Jérôme Goidin, Gabriel Gorre, Jean-Pierre Kahane, Anne-Sophie Lollivier, Samar Mokaiesh, Françoise Perrot, Evariste Sanchez-Palencia, Mireille Tadjeddine, Jean-Claude Vial.

***Ont aussi contribué à la discussion:* Claude Benzaken, Jean-Marie Biau, Bernard Ciroux, Régine Douady, Muriel Esch, Pierre Jullien, Anne-Marie Louis, Rodolph Mouix.**

Le groupe de travail prévoit d'élargir ses thèmes de discussion en sollicitant de nouveaux concours. Il constitue une structure ouverte susceptible d'accueillir d'éventuelles demandes de participation.

Introduction

Constat, objectifs et présentation

Quelle part la science devrait-elle avoir, au 21^{ème} siècle, dans la culture générale? Alors que de nombreux textes abordent cette question indirectement, l'Union rationaliste a décidé de lancer une réflexion portant spécifiquement sur la culture générale scientifique. À cette fin, un groupe de travail a été constitué dont la composition est donnée page 2. Celui-ci s'est fixé comme premier objectif de dégager un ensemble concret de concepts de base et de connaissances pouvant constituer, *avec une compréhension des méthodes de la science*, l'esquisse d'une culture générale scientifique nécessaire au citoyen de demain.

La culture est une richesse intellectuelle qui se nourrit au fil des ans chez chaque personne mais, dans le cas de la culture scientifique, la formation initiale joue presque toujours un rôle majeur dans son acquisition. C'est pourquoi la réflexion du groupe de travail a porté en priorité sur cette formation initiale.

La culture scientifique commune à tous est acquise au collège, avec une possibilité de consolidation en seconde. Tout en espérant que notre rapport sera immédiatement utile aux enseignants de ces classes (collège et seconde), nous avons situé notre travail *en amont de l'élaboration des programmes scolaires* définis pour ces niveaux.

1. Introduction

1.1 Un constat

La science reconstitue progressivement l'histoire de notre Univers, identifie des systèmes planétaires dans la Voie Lactée, cherche à déterminer les conditions de l'apparition de la vie et les mécanismes de l'évolution, décrypte la structure de composés chimiques complexes, effectue la synthèse de matériaux nouveaux, élabore et résout des conjectures mathématiques, interprète l'activité cérébrale de façon de plus en plus précise. Elle ne cesse d'ouvrir de nouveaux domaines de recherche, prometteurs de découvertes.

L'humanité dispose aujourd'hui d'instruments scientifiques sophistiqués et de moyens techniques extrêmement puissants. Nous pouvons guérir des maladies incurables jusqu'à aujourd'hui. Nos moyens de communication sont sans commune mesure avec ce qu'ils étaient il y a quelques décennies. Nous pourrions nous rendre un jour sur la planète Mars. Mais notre activité affecte le devenir du climat et, de ce fait, affecte les conditions de vie dans de nombreuses régions de notre planète.

Si le progrès scientifique et technique n'entraîne pas automatiquement le progrès de la société, il est clair que les changements à effectuer dans notre

mode de développement nécessiteront *plus de science* au cours de ce siècle pour répondre aux besoins de 9 milliards d'hommes et de femmes, économiser les ressources naturelles, sauvegarder la biodiversité, maîtriser le réchauffement climatique et relever d'autres défis qui se posent à nous, souvent à l'échelle mondiale.

En contraste avec cette situation, la science a encore une place très réduite dans la culture des citoyens d'aujourd'hui, y compris celle des 'élites' intellectuelles et politiques. C'est une situation dangereuse pour la démocratie et aussi pour le développement économique. Nos sociétés ont des besoins croissants de chercheurs, d'ingénieurs et de techniciens ; elles ont aussi impérativement besoin de citoyens formés aux méthodes de la science, dotés d'un bagage de culture générale scientifique, quels que soient leurs professions et intérêts culturels.

1.2 Savoirs spécialisés et culture générale scientifique

Le constat ci-dessus, partagé par de nombreuses personnalités, sociétés ou institutions scientifiques, a débouché au fil des années sur d'importantes initiatives, que les Fêtes de la science symbolisent pour le grand public. Force est de constater pourtant que la culture scientifique reste vue à tort par le plus grand nombre comme une somme de savoirs spécialisés, chacun en développement accéléré, qui ne sauraient s'intégrer dans la culture, généraliste par nature. Les premiers échanges de vue que nous avons eus dans le groupe de travail nous ont conduit à penser qu'il y avait là une difficulté réelle qu'il fallait tenter de lever. Les programmes du collège présentent à grands traits la culture scientifique dans le préambule du 'socle commun'. Dans ces programmes, le panorama des connaissances se trouve éclaté entre ce qui sera enseigné dans les classes successives, et entre les disciplines. Il nous a semblé qu'une approche synthétique, dégageant un certain nombre de concepts et rassemblant des connaissances de base sans rompre leur unité est mieux adaptée à la construction d'une culture générale scientifique. Quelques remarques complémentaires ont servi à cadrer le travail entrepris en ce sens.

- Une culture générale scientifique devrait permettre au citoyen d'être mieux armé pour participer de manière constructive aux débats démocratiques à mener sur les nombreuses questions sociétales impliquant la science ou les techniques.
- Une culture générale scientifique ne suffit évidemment pas pour se préparer aux métiers scientifiques ou techniques devenus de plus en plus variés, mais elle permet de situer les connaissances spécialisées dans un large ensemble de repères communs, propre à faciliter les échanges entre domaines scientifiques ou techniques.
- Le contenu de l'enseignement initial, et plus encore les méthodes utilisées dans cette période de formation pour susciter motivation et curiosité des élèves, jouent un rôle essentiel dans l'acquisition à cette étape et ultérieurement des éléments d'une culture générale scientifique. La nécessité de faire largement appel au questionnement en même temps qu'à l'apprentissage du raisonnement, au croisement des disciplines aussi, est reconnue, et pratiquée autant que faire se peut. On ne peut que se réjouir de la place importante donnée dans les programmes actuels de collège à la

‘démarche d’investigation’ et des efforts des enseignants en ce sens, malgré les difficultés (horaires, moyens). Ces méthodes qui relaient celles développées dans le primaire avec ‘La main à la pâte’ contribuent à faire comprendre comment les connaissances scientifiques se forment. De même, un retour sur l’histoire des découvertes et des progrès scientifiques permet parfois de mieux en apprécier le sens et la portée.

- Mais cela ne suffit pas : un certain nombre de connaissances doivent être assimilées ou du moins abordées pour permettre le développement ultérieur de la culture de chacun autour de repères concrets. Si l’effort demandé aux élèves, au collège et en seconde, ne doit pas avoir pour but l’acquisition d’un empilement de connaissances, il est important de les doter d’un bagage initial de culture générale scientifique, alors que l’enseignement des sciences ne se prolonge pas au-delà dans certaines filières de formation.
- La culture générale scientifique déborde ce qui est enseigné au collège dans le cadre des horaires et de l’organisation actuels de l’enseignement en Mathématiques, Sciences physiques et chimiques, Sciences de la vie et de la Terre et Technologie. Certaines notions doivent pouvoir être abordées à travers l’expérimentation, ou par des exemples, ou dans des récits. Certains concepts ou connaissances sont certainement difficiles à exposer en toute rigueur à ce niveau, mais il est important de les introduire pour assurer la cohérence d’ensemble d’un bagage scientifique de base. Il nous semble possible et nécessaire d’en donner à tous une image simplifiée, mais correcte, suffisante à ce stade. Modèles, analogies expérimentales et anecdotes devraient y contribuer (exemple de la notion d’onde). Nous sommes conscients de l’hétérogénéité des acquis des élèves à l’entrée du collège : un effort particulier sur l’enseignement primaire pour redresser cette situation s’impose, plutôt que de renoncer devant des difficultés réelles.
- Une culture générale initiée à l’école, au collège ou au lycée a besoin d’être enrichie, aussi bien au cours d’études supérieures non-scientifiques (et même scientifiques...) que d’études professionnelles – et plus tard encore.
- L’information sur les sujets touchant la science, les technologies et leurs applications est trop souvent délivrée de manière ascientifique, voire anti-scientifique dans certains média d’aujourd’hui. C’est un problème que l’on ne peut guère espérer résoudre qu’à long terme. Comment aider le public à *sélectionner des sources d’information qui soient fiables*? Sans doute faut-il intégrer cet apprentissage dans les initiatives de culture scientifique s’adressant au grand public.
- Le concept même de culture exclut de donner à son contenu un contour rigide.

2. Présentation du document

Le cœur du document vise à donner une vue synthétique des méthodes, des concepts et d’un certain nombre de connaissances pouvant constituer une esquisse de culture générale scientifique. Il est organisé en dix chapitres, eux-mêmes divisés en rubriques. Rappelons qu’il ne s’agit pas ici de proposer une progression qui soit transposable telle quelle dans un enseignement.

Une première partie regroupe quatre chapitres. Les trois premiers sont consacrés à la causalité, à l'invariance des lois de la nature, aux méthodes scientifiques. La compréhension de ces sujets transdisciplinaires est essentielle dans l'enseignement et le débat public. Le quatrième chapitre cherche à donner une vision globale de l'histoire de l'Univers et de la vie. La forme d'un récit a été adoptée pour aborder cette histoire qui a un rôle structurant dans l'appropriation d'une culture générale scientifique.

La deuxième partie rassemble cinq chapitres portant plus spécifiquement sur le monde vivant et sur le monde inerte tel que nous le percevons à notre échelle. Il se conclut par un sixième chapitre consacré aux mathématiques. Si celles-ci sont d'abord une science, le 'langage mathématique' joue un rôle majeur dans l'ensemble des autres sciences.

L'ordre des chapitres dans cette deuxième partie : le monde physique, le monde vivant, les systèmes et leur dynamique, la Terre, les écosystèmes et les ressources naturelles, ou celui adopté pour les rubriques, ne nous paraît pas essentiel. Le dernier chapitre consacré aux concepts et outils mathématiques qui couronne l'ensemble aurait aussi bien pu figurer en tête.

Chacune des rubriques des divers chapitres comporte successivement

- le contenu principal explicité de façon succincte,
- des commentaires et certains éléments considérés moins importants ou excédant le niveau du collège, présentés avec une police réduite,
- des exemples, souvent empruntés à un éventail de disciplines, sont donnés *en italiques*.

Un indexage met les rubriques en relation entre elles. Un de nos objectifs est de montrer que les notions retenues sont utiles dans de multiples champs de la connaissance, hors de celui où elles ont été définies. Chaque rubrique peut cependant être discutée séparément. Certaines se réfèrent à des notions débordant le niveau du collège, pour lesquelles il nous a semblé important de fournir quelques repères (le monde sub-nucléaire par exemple). D'autres encore ont suscité de notre part des commentaires sur des questions importantes dans le débat public.

Nous sommes conscients que le document que nous présentons ici ne traite pas toutes les rubriques retenues de manière équilibrée, qu'il comporte certainement des oublis et peut-être des erreurs ou des expressions prêtant à confusion. Nous nous sommes efforcés d'éclaircir le sens de certains termes 'trop spécialisés', par une définition ou un exemple, afin de rendre ce document compréhensible par tous.

Il nous a paru opportun à ce stade de faire connaître nos réflexions alors que se déroulent des débats visant la 'Refondation de l'Ecole' ou la formation initiale et continue des professeurs, et que le développement des centres de culture scientifique, technique et industriel est plus que jamais actuel.

Première partie

Des principes et des méthodes

Chapitre 1

Causalité [2][2.7*]

- Il n'y a pas d'effet sans cause. Il n'y aurait pas de science possible s'il en était autrement.

- Un effet est *toujours précédé* par sa ou ses causes.

- La science postule un principe causal qui attribue à tout phénomène un antécédent dont il est le conséquent (il s'agit ici de causes efficientes, par opposition aux causes dites finales). Mais tout ce qui précède n'est pas cause. La tâche du scientifique est de chercher à déterminer dans les phénomènes qui précèdent celui ou ceux qu'il faut utiliser pour expliquer ce qui suit.

- En présence d'un phénomène qu'il veut étudier, le scientifique peut souhaiter le décrire seulement, ou aller plus loin et chercher son explication. La démarche scientifique ne s'arrête pas à la mise en évidence d'une première cause, elle recherche la possibilité d'autres causes afin de hiérarchiser leurs rôles. Il faut mettre en garde sur le fait que l'attribution d'une cause à un phénomène complexe est souvent difficile. Dans le domaine de la santé publique en particulier, la relation de cause à effet ne peut pas toujours être établie par une étude expérimentale. Par exemple, la recherche des origines d'une épidémie fait en général intervenir des études statistiques ; la validité des conclusions dépend pour beaucoup d'une maîtrise de l'analyse statistique qui s'ensuit.

- Le mot 'cause' est un mot du langage courant et son usage est donc souvent abusif, notamment dans les médias. Corrélation n'est pas cause.

- *Le principe de causalité a un caractère universel et trouve donc des illustrations dans tous les domaines. Divers phénomènes ou effets observés dans la vie courante ou en travaux pratiques peuvent être exploités pour habituer les élèves à s'interroger sur les causes de ce qu'ils observent.*

- *Corrélation n'est pas cause : dans une ville ensoleillée, le nombre de personnes qui portent des lunettes de soleil à un certain moment de la journée varie, grosso modo, proportionnellement au nombre de personnes qui portent un chapeau au même moment. Ces deux caractères de la population présentent donc une corrélation sans que le port du chapeau soit dû au port de lunettes, ni inversement.*

* Les astérisques renvoient aux rubriques de la *deuxième* partie de ce document.

Chapitre 2

Invariance des lois de la nature dans l'espace et dans le temps [1]

- Les mêmes causes produisent les mêmes effets, en tout lieu et en tout temps. Il n'y aurait pas de science possible s'il en était autrement.
- Cette invariance a un caractère universel, mais elle ne prévaut que dans la mesure où l'effet ou le phénomène considéré n'est en aucune façon affecté par son environnement.
- Elle implique qu'une expérience n'a de valeur scientifique que si elle peut être reproduite ailleurs et à n'importe quelle date.

- Cette invariance n'implique pas une évolution unique d'un système complexe, par exemple celle d'un écosystème.
- Un effet se caractérise parfois par une loi de probabilité (cf. 6.13*). Ainsi, il n'est pas possible de prédire avec précision l'instant de désintégration d'un noyau radioactif, mais la loi de décroissance d'un échantillon contenant un grand nombre de tels noyaux est exactement connue : c'est une décroissance exponentielle. Celle-ci constitue une loi de probabilité pour la désintégration de *chacun* des noyaux de l'échantillon. Autre exemple : lorsqu'on bombarde un écran percé d'un petit trou par des particules (électrons, photons...), la direction de la vitesse d'une particule qui passe par le trou est modifiée : *après* la traversée, cette direction est différente (en général) de ce qu'elle était *avant* la traversée. L'amplitude de ce changement de direction varie d'une particule à une autre ; elle satisfait une loi de probabilité qui caractérise l'effet de 'diffraction' créé par le trou.

Chapitre 3

Méthodes scientifiques

3.1 Observation, hypothèse, expérience [3.2][3.3]

- *Observation* : point de départ d'une réflexion scientifique, jalon ou aboutissement d'un programme expérimental.
- *Hypothèse* : point de départ d'une investigation scientifique (théorique ou expérimentale).
- Une *expérience* est faite en général dans un but bien défini (par exemple pour valider ou rejeter une hypothèse). Elle porte alors sur un système aussi bien délimité que possible, et s'exécute selon un protocole précis, préalablement établi. Le chercheur peut faire une expérience *exploratoire*, susceptible de révéler une piste nouvelle.
- Un protocole expérimental définit, en particulier, les conditions initiales du système sur lequel porte l'expérience et comprend des contrôles du bon déroulement de celle-ci.

- Le plus souvent, il est nécessaire de s'appuyer sur un ensemble d'observations ou d'expériences pour parvenir à une conclusion irréfutable.
- Le chemin de l'hypothèse au protocole, de l'expérience à son analyse et au résultat final fait appel à des raisonnements logiques et à des analyses critiques, et souvent à des calculs mathématiques.

Exemples d'observations : Galilée observe les satellites de Jupiter (1610), H-C Oersted observe l'action d'un courant électrique sur une boussole (1820), R. Brown observe le mouvement de grains de pollen en suspension dans un liquide (1827), C. Darwin observe la faune sauvage et des fossiles tout autour du monde (1831-1836), Marie Curie observe que la pechblende (minerais d'uranium) est plus active que l'uranium métallique (1898), Alexander Fleming observe que certaines moisissures (Penicillium) détruisent des cultures de staphylocoques (1928).

3.2 Complémentarité entre expérimentation et théorie [3.1][3.3]

- L'expérimentation peut susciter ou guider des développements théoriques.
- La validation d'une théorie s'appuie toujours sur des expériences ou des observations.
- La portée d'une théorie est d'autant plus grande (1) que les observations dont elle rend compte sont nombreuses et (2) qu'elle prédit des effets non encore observés – et effectivement observés par la suite.

- Dans certains domaines, l'expérimentation *directe* n'est pas toujours possible. Le progrès scientifique passe alors par la multiplication des observations et la recherche de relations entre elles. Par exemple, la géologie, la paléontologie ou l'astronomie sont fondées, pour l'essentiel, sur des observations plutôt que sur des expériences au sens propre du terme – du fait que des conditions initiales ne peuvent pas être choisies (le système étudié ne peut pas être 'préparé').

3.3 La construction du savoir scientifique [3.1][3.2][5.4*]

- Le savoir scientifique est constamment en construction, sur la base d'allers et retours toujours renouvelés entre expérience et théorie. L'invention de nouveaux instruments a joué un rôle essentiel dans l'élargissement des possibilités d'exploration du ciel, de la matière et de la vie.
- Il peut arriver qu'une nouvelle observation ou expérience amène à redéfinir le domaine de validité d'une théorie formulée antérieurement à ce nouveau résultat. Mais une telle révision est limitée : elle ne remet pas en question les acquis scientifiquement validés. La relativité ne remet pas en cause les lois de Newton qui en sont une limite à faible vitesse.

- Il faut exclure des formulations ambiguës telles que 'telle connaissance est valide tant qu'elle n'a pas été réfutée'. En voulant signifier les limites de la notion de vérité absolue, on en vient à suggérer qu'au fur et à mesure qu'elle progresse, la science abandonnerait des pans entiers de connaissances précédemment acquises. On ne conçoit pas pourtant que l'on puisse remettre en cause l'existence des atomes, pour prendre un seul exemple.

- Non seulement les nouveautés de la science ne la remettent pas constamment en cause, mais quand une découverte nouvelle limite une vérité précédente, celle-ci est confirmée à l'intérieur de cette limite. *Exemple : la chimie des éléments de Lavoisier a montré qu'on ne*

pouvait réaliser des transmutations — comme le prétendaient les alchimistes. Contrairement à ce que prétendent certains vulgarisateurs, la physique nucléaire n'a pas permis de produire de tels passages d'un élément à un autre par des manipulations chimiques, elle a au contraire, expliqué leur impossibilité. Les transmutations nucléaires mettent en effet en jeu des énergies formidablement plus élevées que celle des réactions chimiques (cf 1.4).*

- Exemples d'instruments ayant ouvert de grands domaines de recherche : la lunette de Galilée, le microscope.
- Des exemples de liens directs entre observations et progrès théoriques sont à prendre dans l'histoire des sciences, selon les préférences de chacun. Exemple emprunté à la physique : mesures astronomiques de Tycho Brahé et lois de Johannes Kepler.

3.4 Mesures et leurs incertitudes [3.5][6.6*][6.12*]

- Unités, erreurs, chiffres significatifs.
- Changement d'unités.
- Erreurs statistiques et erreurs systématiques.
- Le résultat numérique d'un calcul ou d'une mesure est sans valeur en absence d'unité.
- L'indication de l'incertitude pesant sur un résultat est une donnée essentielle.
- Il ne faut pas confondre la *précision* d'une mesure, qui peut être excellente, et l'*exactitude* de la mesure, sensible aux erreurs systématiques (*on peut lire l'heure à la seconde près, alors que la montre peut retarder ou avancer de plus d'une seconde*).
- Des exemples de mesure accompagnée de son incertitude peuvent être pris dans des secteurs très divers, notamment des secteurs de la vie courante.

3.5 Ordres de grandeur [3.4][1.1*][1.3*][2.5*][5.2*][6.5*]

- Il s'agit de dégager l'essentiel d'un résultat numérique (lorsque ce n'est pas la précision de celui-ci qui lui confère sa valeur scientifique).
- La *vraisemblance* d'un résultat numérique peut en général être contrôlée sur la base d'une estimation — a priori ou a posteriori — de son ordre de grandeur.
- L'expression d'un ordre de grandeur fait souvent appel aux puissances de dix.
- Il est souhaitable de faire appel à la notion d'ordre de grandeur chaque fois que c'est possible! *Des exemples peuvent être pris dans des secteurs très divers, notamment des secteurs de la vie courante.*
- La mémorisation des ordres de grandeur relevant de différents domaines (physique, chimie, sciences de la Terre et de la vie) permet d'acquérir des repères utiles dans un ensemble très large de connaissances. *Exemples : la longueur de l'équateur, la vitesse de la lumière, le nombre d'Avogadro, l'énergie nécessaire pour rompre une liaison chimique, le nombre de gènes du génome humain, la population mondiale.*
- La comparaison des ordres de grandeur de données relatives à un même domaine est un moyen d'en acquérir une première représentation : *on peut comparer par exemple les tailles respectives d'une protéine, d'un gène, d'une bactérie, d'une cellule eucaryote, d'une mouche, ou celles de la Terre, du Soleil, du système solaire, de la Voie Lactée.*

Chapitre 4

Une histoire de l'Univers et de la vie

Ce chapitre vise à donner une vue d'ensemble, essentiellement à travers un récit dont une version simplifiée peut être 'racontée' très tôt, puis qui peut-être reprise à plusieurs niveaux de la formation.

4.1 Histoire de l'Univers [1.1*][1.2*][5.1*]

- Une histoire de 13,5 milliards d'années pour la matière et de près de 4 milliards d'années pour les organismes vivant sur notre planète (seules formes de vie dont l'existence soit démontrée).

- La matière s'est structurée au cours de l'histoire de l'Univers : de la formation des noyaux atomiques à celle des amas de galaxies.

- Systèmes planétaires.

- L'Univers est en expansion depuis 13,5 milliards d'années. Les connaissances actuelles retracent son évolution à partir d'une 'explosion' (le *big bang*) qui prit place alors que le contenu de l'Univers était extraordinairement dense et chaud. L'expansion a entraîné le refroidissement de ce contenu qui, initialement dominé par du rayonnement, est devenu dominé par de la matière (il l'est encore aujourd'hui). Dans cette matière, au bout d'un temps très bref, les 'quarks' sont devenus les composants dominants. Ils ont donné naissance aux protons et aux neutrons, seulement dix millièmes de seconde après le *big bang*. Certains des noyaux atomiques les plus légers (autres que les protons, noyaux des atomes d'hydrogène) se sont formés quelques secondes à quelques minutes plus tard. Il fallut attendre que l'expansion se poursuive pendant quelque 400 000 ans et que l'Univers soit suffisamment refroidi pour que les protons puissent capturer des électrons et former des atomes d'hydrogène. L'échelle qui caractérise l'expansion était alors 1000 fois plus petite qu'elle ne l'est aujourd'hui. Ces atomes d'hydrogène (et en moindre quantité, d'hélium) formèrent les premiers nuages de gaz.

La structuration de ce gaz s'est effectuée sous l'effet de la gravitation universelle. Les premières étoiles sont apparues lorsque l'Univers avait environ 400 millions d'années et les premières galaxies (une galaxie contient typiquement quelques centaines de milliards d'étoiles) se sont formées dans les 500 millions d'années qui suivirent. (Ces sources de lumière ont ré-ionisé l'hydrogène intergalactique.) Depuis, la plupart des galaxies se sont rassemblées en amas et en superamas ou filaments. Les réactions nucléaires qui permettent aux étoiles de briller pendant des millions ou des milliards d'années et celles qui prennent place lors des explosions qui marquent la fin de vie des étoiles les plus massives sont à l'origine de la formation des divers éléments chimiques.

Le système solaire auquel la Terre appartient s'est formé dans la Voie Lactée (notre galaxie) il y a environ 4.5 milliards d'années.

- Plus de 600 systèmes planétaires ont été identifiés dans la Voie Lactée (fin 2012) et le plus peuplé d'entre eux comprend au moins 5 planètes. Au total, c'est près d'un millier de planètes qui ont été détectées.

4.2 Histoire de la Terre [4.3][5.2*]

- Les grandes phases de l'histoire de la Terre.
- Les changements climatiques.
- Une chaleur intense accompagnée de grandes éruptions volcaniques a régné pendant une période initiale de quelques centaines de millions d'années. Un profond bouleversement de la distribution des matériaux s'est produit, avec la constitution du noyau, du manteau, de la croûte, et d'une atmosphère primitive constituée par les gaz provenant de l'intérieur de la Terre. Puis s'est mis en place un mouvement de convection dans le manteau pour évacuer la chaleur interne. Ensuite se sont formées les plaques lithosphériques (formées de la croûte et du manteau supérieur) avec constitution de continents de matière légère ('écume de la terre').

Le résultat de cette mise en place est l'étagement des éléments selon la densité des matériaux: la croûte, de densité 2,7 (continents), est faite de silicates d'aluminium et d'autres métaux légers : Na, K..., le manteau (densité 3,2 à 5) est fait de silicates de magnésium et de fer ; quant au noyau, de densité 10 (noyau externe) à 14 (noyau interne), il est fait essentiellement de fer, avec un peu de soufre et de nickel. L'atmosphère, réductrice à l'origine, s'est chargée, lors de l'apparition des synthèses chlorophylliennes, de dioxygène. La présence d'une quantité suffisante de dioxygène a permis le développement des formes de vie plus élaborées que nous connaissons actuellement.

Le climat de la Terre a connu des alternances de périodes froides et de périodes chaudes au cours de son histoire. Parmi les facteurs qui influencent le climat, la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère joue un rôle important. Le changement climatique (un réchauffement) récent est principalement attribué aux rejets de dioxyde de carbone associés aux activités humaines.

4.3 La vie – évolution et biodiversité [4.2] [1.2*][1.3*][3.4*][3.5*]

L'histoire de la vie peut être esquissée en quelques étapes majeures telles que l'émergence d'organismes unicellulaires procaryotes, l'apparition des premières cellules eucaryotes, l'apparition d'organismes pluricellulaires, la sortie de la vie du milieu marin...

- On ignore à l'heure actuelle les conditions physico-chimiques environnementales dans lesquelles les premiers êtres vivants sont apparus à la surface de la Terre, et les caractéristiques précises de ces premiers organismes.

L'eau est un constituant majeur des organismes, et un solvant indispensable à la réalisation des réactions chimiques caractéristiques du vivant : on pense que la Terre était alors recouverte, en partie au moins, d'eau liquide. Longtemps on a cru que les briques carbonées élémentaires qui servent à fabriquer les macromolécules du vivant ne pouvaient résulter que de réactions chimiques s'étant produites à la surface de la Terre. Aujourd'hui, on sait que de tels composés se forment spontanément dans l'espace interstellaire à partir de molécules simples et ont pu être apportés à la surface de la Terre par des micrométéorites.

Les premiers êtres vivants étaient probablement des procaryotes simples. Les premiers fossiles de bactéries clairement identifiables ont plus de trois milliards d'années (stromatolithes).

L'ignorance des conditions précises qui ont permis l'apparition des premiers êtres vivants sur Terre – les seuls connus ! – rend difficile toute estimation de la probabilité que des phénomènes analogues se soient produits sur d'autres planètes du système solaire, ou sur des exoplanètes tournant autour d'autres étoiles que le Soleil. L'existence d'une vie extraterrestre reste donc problématique.

Il n'y a aucune raison de penser que les mécanismes qui ont été à l'origine de la formation des premiers êtres vivants sur Terre ne continuent pas à agir. Néanmoins, si des pré-formes de vie apparaissaient aujourd'hui, elles seraient immédiatement détruites par les organismes déjà existants.

Les premières formes de vie ont acquis assez rapidement la capacité d'utiliser l'énergie solaire pour casser la molécule d'eau et fabriquer des composés organiques en rejetant du dioxygène dans les océans puis dans l'atmosphère. L'augmentation de la concentration atmosphérique en dioxygène qui en a résulté a eu deux conséquences : d'une part elle a permis à d'autres organismes d'utiliser cet oxygène pour un métabolisme oxydatif au rendement particulièrement favorable. D'autre part, le dioxygène atmosphérique, et la couche d'ozone qui en est dérivée, ont protégé la surface de la Terre contre l'effet délétère des rayonnements, ce qui a contribué à la stabilité des organismes vivants.

Une seconde transformation majeure, qui s'est produite il y a un peu plus d'un milliard d'années, a été l'apparition d'une cellule eucaryote dans laquelle le matériel génétique est enfermé dans un noyau limité par une membrane. La cellule eucaryote a été le résultat de processus de symbiose, de la fusion de deux ou plusieurs microorganismes dont l'un était porteur d'un métabolisme oxydatif. Les premiers organismes multicellulaires formés de cellules eucaryotes sont apparus peu après.

Les premières plantes terrestres se sont formées il y a un peu plus de 400 millions d'années, et les premiers tétrapodes (animaux à quatre membres tels que les dinosaures, les reptiles ou les oiseaux) il y a un peu moins de 400 millions d'années. Les premiers mammifères sont apparus il y a 200 millions d'années.

L'ensemble des formes de vie, passées et présentes, peut être mieux représenté sous forme d'un buisson que sous forme d'un arbre. Des processus d'extinction, comme celui des dinosaures il y a 65 millions d'années, ont joué un rôle majeur, ce qui a favorisé une radiation évolutive aux organismes qui ont survécu. A l'opposé, l'époque du Cambrien, il y a 500 millions d'années, a correspondu à une diversification rapide des formes de vie, sans doute à la suite de changements environnementaux importants à la surface de la Terre.

Le moteur de l'évolution est la variation aléatoire et la sélection des variations qui, dans l'environnement où vivent les organismes, leur assurent la plus grande descendance. Ce mécanisme darwinien d'évolution est doublement aléatoire : d'une part, les variations se produisent indépendamment des effets qu'elles peuvent avoir sur la capacité reproductive des organismes qui les ont acquises ; d'autre part, la sélection se fait à un temps donné dans un environnement particulier dont les caractéristiques sont, elles aussi, le fruit d'événements aléatoires. D'autres processus aléatoires interviennent dans l'évolution des organismes, pouvant induire en particulier une 'dérive génétique'.

Les preuves de l'évolution des formes vivantes sont nombreuses, et de natures très différentes : caractérisation des organismes fossiles, comparaison des formes de vie actuelles et passées. Il n'existe pas de théorie scientifique concurrente à la théorie de l'évolution présentée précédemment. Le créationnisme, l'idée que l'apparition de la Terre et des espèces vivantes s'est produite exactement comme le raconte la Bible, est scientifiquement faux, puisque contredit par d'innombrables observations, notamment en paléontologie. *L'Intelligent design*, l'idée que l'évolution des organismes ne peut s'expliquer que par l'intervention d'un 'être suprême' qui

avait l'espèce humaine comme objectif final n'est pas une théorie scientifique puisqu'elle ne fait pas appel à des mécanismes naturels pour expliquer la transformation des formes vivantes.

L'évolution de l'être humain présente les mêmes caractéristiques que l'évolution des autres formes vivantes : aspect buissonnant, effet majeur de l'adaptation à l'environnement, importance des variations aléatoires et neutres. L'espèce humaine moderne a quitté le continent africain il y a environ quatre vingt mille ans et commencé à peupler l'ensemble des autres continents. Elle a rencontré sur sa route des populations humaines plus anciennes, comme les néanderthaliens, qui ont disparu peu après. L'histoire de l'*Homo sapiens* est aussi celle du développement des outils qu'il a créés.

L'extinction de certaines formes vivantes a accompagné l'histoire de la vie. Cela ne signifie pas que la diminution rapide de la biodiversité observée aujourd'hui sous l'effet de l'action humaine ne soit pas inquiétante par sa rapidité et son amplitude exceptionnelles.

Deuxième partie

Des savoirs pour une culture générale

L'ensemble des rubriques qui suivent vise à donner une vue synthétique des différents champs scientifiques ; il inclut des suggestions de rapprochement entre ces rubriques (indiquées entre crochets à la suite des titres et marquées d'une étoile pour les rubriques de la première partie). La culture scientifique n'est pas un encyclopédisme : elle vise en priorité une aptitude au questionnement, une démarche rigoureuse excluant tout dogmatisme, une prise en compte des faits, une ouverture à la critique. L'objectif ici est de faciliter le choix par chacun des notions les mieux à même de servir de repères, de points d'ancrage pour la construction de leur propre culture. Il est de donner un cadre cohérent susceptible d'encourager la recherche d'informations plus détaillées sur la toile. Enseignants ou médiateurs scientifiques peuvent y trouver des éléments pour construire un cours, organiser une exposition ou des conférences.

Chapitre 1

Les structures de la matière inerte et de la matière vivante

1.1 Constituants fondamentaux de la matière [3.5*][4.1*][1.2]

- Ordre de grandeur de leurs dimensions (protons et neutrons, noyaux, molécules simples, macromolécules).
- Les atomes, généralement associés en molécules, sont les constituants fondamentaux de la matière inerte dans notre environnement et de la matière vivante.
- La plus grande partie de la matière des atomes est concentrée dans un noyau central chargé d'électricité positive autour duquel circulent des électrons (ordre de grandeur des masses et des dimensions relatives).
- A ce jour, on ne sait que placer une valeur supérieure aux dimensions des électrons.
- Les noyaux atomiques sont constitués de protons – ceux-ci sont les noyaux les plus simples, ceux des atomes l'hydrogène – et de neutrons, qui sont très semblables aux protons mais n'ont pas de charge électrique.
- Des atomes dont les noyaux possèdent le même nombre de protons et un nombre différent de neutrons sont appelés 'isotopes'. La plupart des isotopes existant dans notre environnement sont stables, parce que leurs noyaux sont stables. Quelques uns sont naturellement instables. Ces derniers sont dits 'radioactifs' ; ils émettent différents types de

rayonnement lors de leur transformation. On sait produire des isotopes radioactifs n'existant pas dans la nature.

- Dans la matière de notre environnement, les noyaux restent emprisonnés en règle générale à l'intérieur des atomes (il faut beaucoup d'énergie pour arracher tous leurs électrons). Ce n'est pas le cas à l'intérieur des étoiles.

- *Si les dimensions d'un atome étaient multipliées de sorte qu'il occupe toute la Place de la Concorde, son noyau deviendrait comparable à un pépin de pomme.*

- *Exemples à prendre dans les domaines de physique nucléaire, physique atomique et moléculaire, physique de la matière condensée, etc.*

1.2 Éléments chimiques [4.1*][1.1][1.3]

- La matière est constituée d'éléments chimiques dont le tableau périodique de Mendeleïev donne une vue synthétique. Les éléments y sont classés en fonction de leur masse, puis numérotés (de 1 pour l'hydrogène à 92 pour l'uranium), et ordonnés par familles en regroupant les éléments de propriétés similaires dans une même colonne (les halogènes, les gaz rares, les métaux alcalins etc.).

- Éléments rencontrés le plus fréquemment dans la Terre, les planètes, les étoiles, l'Univers.

- Le nombre d'atomes dans une mole d'un élément (12 g de carbone par exemple) est environ 600 000 milliards de milliards.

- Des éléments au-delà de l'uranium n'existent pas dans la nature mais peuvent être produits artificiellement.

- Le numéro atomique de chaque élément est égal au nombre de charges électriques positives (celles des protons) contenues dans le noyau de l'atome correspondant ; ces charges équilibrent la charge totale des électrons du cortège électronique. Les propriétés chimiques de l'élément sont déterminées par la structure du cortège électronique. Les électrons situés à la périphérie de ce cortège sont ceux qui participent aux différents types de liaisons avec d'autres atomes pour former des molécules.

1.3 Principaux éléments chimiques de la matière vivante [3.5*][1.2][1.4][3.1]

- Le carbone, l'hydrogène et l'oxygène ont une place essentielle dans les êtres vivants. Les atomes d'hydrogène et d'oxygène se trouvent combinés, pour une large fraction, sous forme d'eau.

- Les autres éléments importants dans la matière vivante sont l'azote, le phosphore, le soufre, le calcium.

- L'eau est un liquide très mobile et c'est un remarquable solvant. Sa capacité calorifique massique (quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré une masse unité) est très élevée comparée à de nombreux autres corps.

- Le carbone peut se lier à 4 autres atomes pour former un assemblage tétraédrique. Cela explique l'extraordinaire diversité et la stabilité de très nombreuses structures mettant en jeu cet élément.

1.4 Architectures moléculaires [1.5][1.7][2.4][2.5][3.4][3.6][6.8]

- La chimie étudie la structure et les transformations de la matière, qu'elle soit naturelle ou synthétique. Elle permet de construire des structures moléculaires de plus en plus complexes et diverses, manifestant de nouvelles propriétés.
- Liaisons entre atomes, formation de molécules.
- Exemples de structures (dans l'espace) de quelques molécules jouant un rôle important en chimie et en biologie, telles que H₂, O₂, N₂, H₂O, CO₂, molécules organiques (linéaires ou cycliques), polymères, ADN, ou en sciences de la Terre (oxyde de silicium ou d'aluminium).
- Il n'y a pas de 'produits chimiques naturels', mais des 'substances naturelles' et des 'substances synthétiques'.
- Les liaisons chimiques mettent en jeu les électrons situés à la périphérie des atomes ; elles sont de différents types (liaisons covalentes, liaisons dites 'hydrogène'...)

1.5 Réaction chimique [1.4][1.7][2.5][3.3]

- Réarrangement des atomes au cours d'une réaction chimique.
- Réactifs et produits courants en chimie minérale.
- L'énergie *libérée* lors de la formation d'une liaison — qui est aussi celle qu'il faut *fournir* pour rompre cette liaison — est d'un ordre de grandeur similaire à l'énergie qui caractérise l'agitation thermique des molécules à la température ambiante. D'où l'importance de la température dans le rendement de nombreuses réactions chimiques.
- Comparée à l'énergie requise pour briser un noyau atomique, l'énergie nécessaire pour rompre une liaison chimique est ~ un million de fois plus faible !
- La vitesse de réaction et le rendement conditionnent l'utilisation pratique des réactions chimiques.
- Les énormes possibilités de la chimie organique débouchent sur la production de nombreux produits industriels, notamment pharmaceutiques.
- Exemples : réactions d'oxydation, de réduction, acide sur base, réactions de synthèse.
- En biologie, réactions intervenant dans le métabolisme.
- Catalyse : exemple des enzymes.

1.6 Les changements d'états de la matière [1.7][2.9]

- Un corps chimique peut prendre différentes formes selon la température et la pression : solide, liquide ou gaz. La transition d'une forme à l'autre implique, selon son sens, une absorption ou un dégagement de chaleur.
- Des corps chimiques différents peuvent se dissoudre dans certains cas l'un dans l'autre.
- Un gaz dont les atomes sont ionisés (il s'agit ici d'atomes qui ont *perdu* des électrons et de ces électrons) constitue une forme particulière de matière appelée 'plasma'. La foudre crée un plasma sur son trajet. De façon générale, des décharges électriques peuvent créer un plasma.

1.7 Matériaux [1.4][1.5][1.6][2.9]

- Les matériaux sont constitués de molécules ou d'ions de compositions et de structures très diverses.
- Alliages.
- Polymères naturels ; leur rôle majeur dans la matière vivante.
- Polymères artificiels, rôle des matières 'plastiques'.

- Dans les cas les plus simples, les alliages sont des solutions solides d'un métal dans un autre.
- On sait synthétiser de nombreux matériaux que l'on trouve dans la nature.
- Plus récemment, on a appris à synthétiser des matériaux à l'échelle du nanomètre (nanomatériaux). Leurs propriétés sont souvent très différentes des matériaux de même composition mais qui n'ont pas été 'fragmentés' à cette échelle nanométrique.
- *De nombreux exemples peuvent être pris dans le secteur industriel, notamment les polymères d'origine biologique utilisés dans l'industrie.*

Chapitre 2

Le monde physique

2.1 Le temps [5.2][6.11]

- Mesure du temps au cours des âges.
- Définition de la seconde, du jour
- Irréversibilité de l'écoulement du temps, contrairement aux thèmes abondamment utilisés dans la science-fiction !

- Le temps est la grandeur physique que l'on sait mesurer avec la plus grande précision et sert donc de référence dans de nombreux domaines, notamment en science fondamentale, mais pas seulement — pour les GPS par exemple. Certaines 'horloges' ne perdent ou ne gagnent qu'une seconde toutes les 50 millions d'années.
- Le temps universel est fondé sur la rotation de la Terre ; il présente des irrégularités par rapport à une horloge atomique.
- La mesure du temps permet de faire une large place à l'instrumentation.
- *L'histoire des sciences et des techniques permet d'illustrer abondamment ce sujet (de l'horloge à eau à l'horloge atomique).*
- *Cadran solaire, horloge à balancier, montre à quartz.*

2.2 Masse et inertie [2.4][2.7]

- Le résultat expérimental qui permet d'identifier 'inertie' et 'masse' est le fait que tout objet subit la même accélération dans un champ de pesanteur donné.
- Conservation de la masse : la masse *totale* d'un système *isolé* est conservée, y compris lorsque des réactions chimiques y prennent place.

- Les confusions entre *masse* et *poids*, et entre *masse* et *inertie*, sont très fréquentes. Le poids est la force qui résulte de l'attraction exercée par la Terre et de l'effet d'entraînement dû à la rotation de la Terre sur elle-même. La mesure d'une masse s'obtient en faisant le rapport de deux poids, celui de l'objet en question et celui d'une masse étalon. La mesure de l'inertie d'un objet fait appel à une expérience de dynamique portant sur cet objet (accélération d'une voiture par une force d'intensité connue, par exemple).
- A l'échelle microscopique, notamment dans une réaction nucléaire, la loi d'Einstein d'équivalence de la masse et de l'énergie doit être prise en compte.

2.3 Charge électrique [2.4][2.7]

- La charge électrique est une quantité qui est strictement conservée.
- La charge, conventionnellement positive, portée par un proton est exactement opposée à celle portée par un électron.
- Les atomes sont électriquement neutres : la charge totale du noyau, due aux protons qu'il contient, est exactement compensée par la somme des charges des électrons qui forment le cortège de ce noyau.
- Les atomes dont le cortège électronique a perdu ou gagné des électrons prennent le nom d'ions positifs ou négatifs.
- En règle générale, ce sont les électrons qui assurent le transport de l'électricité.
- Des ions peuvent aussi transporter de l'énergie, par exemple lors d'une électrolyse.
- Lorsqu'une réaction chimique prend place en solution aqueuse, ce sont des ions plutôt que des atomes qui réagissent entre eux.

2.4 Interactions fondamentales [1.4][2.2][2.3][2.7][5.1]

- Les deux interactions qui interviennent dans notre environnement habituel et sur lesquelles l'expérimentation est aisée sont l'interaction gravitationnelle et l'interaction électromagnétique.
- Comparaison de leur portée (infinie dans les deux cas) et de leur intensité (l'intensité de l'interaction électromagnétique est considérablement plus grande).
- Tous les processus chimiques résultent de l'interaction électromagnétique et d'elle seule.
- *La chute des corps et le mouvement des planètes autour du Soleil résultent de l'interaction gravitationnelle.*
- *L'attraction d'un bout de papier par un peigne de corne frotté avec de la laine ou la déviation de l'aiguille d'une boussole résultent de l'interaction électromagnétique.*
- *Un moteur électrique offre un autre exemple d'interaction électromagnétique, à savoir l'action d'un champ magnétique sur un conducteur parcouru par un courant, le champ magnétique étant lui-même généré par un courant circulant dans des fils du moteur.*

2.5 L'énergie [3.5*][1.4][1.5][2.6][2.8][3.3][4.6][5.4]

- L'énergie se présente sous de multiples formes : mécanique (cinétique ou potentielle), thermique, lumineuse, chimique, électrique, nucléaire... Elle est mise en jeu dans des phénomènes tels que : mettre en mouvement, chauffer, éclairer, transformer un objet inerte ou vivant. Les échanges d'énergie entre systèmes conservent *strictement* l'énergie totale de l'ensemble des systèmes.

- La transformation d'une forme d'énergie dans une autre s'effectue avec un rendement (rapport de l'énergie obtenue sur l'énergie initiale) qui dépend des formes d'énergie considérées et des conditions pratiques. L'énergie manquante se retrouve sous une ou plusieurs autres formes, souvent sous forme d'énergie thermique. Par exemple, la transformation d'énergie mécanique en énergie électrique dans un alternateur de voiture ou dans une éolienne s'accompagne toujours de production de chaleur.

- Dans le cas très particulier de la transformation d'énergie électrique en énergie thermique le rendement est proche de 1.

- La transformation d'énergie thermique en énergie mécanique a, en pratique, un rendement qui ne dépasse que très rarement 40 %. Cette limitation sévère tient au fait que l'énergie thermique est liée aux mouvements désordonnés de composants microscopiques.

- On confond souvent *énergie* et *puissance*. La puissance des appareils électroménagers est typiquement de quelques centaines à quelques milliers de watts. La facture électrique est fondée sur l'énergie consommée, c'est-à-dire sur le produit de cette puissance par la durée d'utilisation. L'unité utilisée pour la consommation domestique est habituellement le kilowattheure (kWh).

- L'énergie est un mot du langage courant, ce qui est source de confusion. L'unité d'énergie est le joule et l'unité de puissance est le watt. On est amené cependant à mesurer l'énergie dans des phénomènes très variés et d'ordres de grandeur prodigieusement différents (de l'échelle atomique à celles de la Terre ou d'une étoile). Au fil d'une longue histoire, un grand nombre d'unités ont été utilisées dont certaines restent importantes aujourd'hui (tel l'électron-volt en physique ou la kilocalorie dans l'alimentation).

- La loi de conservation (1^{er} principe de la thermodynamique) peut être énoncée sous la forme : il n'existe pas de mouvement perpétuel dont le seul résultat soit la production d'énergie.

- Le 2^{ème} principe de la thermodynamique rend compte des limitations portant sur le rendement d'une transformation d'énergie thermique en travail. Il stipule qu'il n'existe pas de machine prélevant de l'énergie thermique à une *seule* source et fournissant du travail (par ex. un bateau qui avancerait en 'pompan' des calories à la mer et en y rejetant des blocs de glace).

- Le rendement doit être précisé pour chaque type de transformation (par ex. d'énergie lumineuse en énergie électrique).

- Stockage de l'énergie : seules certaines formes d'énergie peuvent être stockées directement : c'est le cas de l'énergie chimique (charbon, pétrole, gaz) et de l'énergie mécanique (les barrages). L'énergie électrique peut être stockée dans un 'condensateur' ou un 'accumulateur', mais en quantité très limitée. Le stockage de l'énergie sous forme chimique renvoie à l'énergie nécessaire pour rompre une liaison chimique.

- Exemples : énergie cinétique d'une voiture roulant à 100 km/h : $\sim 3 \cdot 10^5$ J, énergie potentielle d'un m^3 d'eau dans un lac de barrage dont la hauteur de chute est 150 m : $\sim 1,5 \cdot 10^6$ J ($\sim 0,5$ kWh), énergie chimique dans un morceau de sucre : ~ 20 kcal ($\sim 10^5$ J), énergie chimique dans un litre d'essence : $5 \cdot 10^7$ J (~ 10 kWh), énergie libérée par la fission de 1 g d' U^{235} : $\sim 10^{11}$ J ($\sim 30\,000$ kWh), énergie transportée par un photon du rayonnement visible ($\sim 0,5 \cdot 10^{-18}$ J).

2.6 Chaleur, température, rayonnement [2.5][2.8][4.6][6.13]

- La chaleur est une forme d'énergie, dite thermique, qui résulte du mouvement désordonné des molécules. L'absorption de chaleur élève la

température d'un corps et fait que l'agitation de ses composants microscopiques s'accroît ; cet effet peut faire passer le corps de l'état solide à l'état liquide ou gazeux.

- La température est une mesure du degré d'agitation des composants microscopiques.
- Tous les corps émettent un rayonnement, c'est-à-dire de l'énergie. Ils en reçoivent de leur environnement.
- Les concepts de chaleur et de température peuvent être dégagés en faisant appel à l'histoire des sciences. En les abordant à l'échelle microscopique, on espère favoriser une vision intuitive (1) de la façon dont l'énergie est emmagasinée dans un corps que l'on chauffe, (2) de la notion de température.
- Le spectre du rayonnement émis dépend de la température et des éléments présents.
- Tout corps rayonne et reçoit un rayonnement. En l'absence d'autres sources thermiques, une température d'équilibre s'établit.

- Exemples de questions que pose la mesure d'une température : quel écart peut-il y avoir entre l'indication d'un thermomètre et la température effective de l'objet dont on souhaite connaître la température? Que représente l'indication d'un thermomètre qui est exposé au soleil?

- Exemple du bilan thermique de la Terre.

- La couleur d'une flamme fournit des informations sur les éléments chimiques présents dans le corps qui brûle et sur la température à laquelle la combustion s'effectue. Il en est de même avec la couleur des étoiles, indicative de leur température de surface : les étoiles les plus bleues sont bien plus chaudes (jusqu'à 35 000°) que les étoiles rouges (2 500°) : quelques exemples repérables dans le ciel : Rigel, Vega, Sirius : bleues ; Soleil, Antarès : jaunes (qui tire vers le vert) ; Bételgeuse : rouge.

2.7 Champ [1*][2.2][2.3][2.4][5.2]

- Le champ gravitationnel et ses sources (toute masse).
- Le champ magnétique et ses sources (aimants, courants électriques).
- Le champ électrique et ses sources (électrons, protons).

- Il n'y a pas d'action à distance. Les interactions entre aimants, ou entre particules chargées électriquement, ou entre deux masses, se font par l'intermédiaire de champs. Ceux-ci représentent des modifications locales du 'vide' – qui n'est alors plus vide! puisqu'il est modifié par la présence de ces champs.

- Toute forme d'énergie doit être prise en compte dans le calcul des masses qui constituent les sources du champ gravitationnel, en utilisant la relation d'équivalence $m = E/c^2$.

- Le champ électrique et le champ magnétique sont deux 'manifestations' d'une même et seule interaction.

- Le concept de champ peut être abordé avec le champ gravitationnel terrestre qui est perçu physiquement. Ce champ ou le champ magnétique d'un aimant permanent peuvent faire l'objet de cartes indiquant direction et intensité (module) locales (en imaginant qu'un expérimentateur explore le voisinage de la Terre avec un fil à plomb suspendu à un ressort pour le premier, avec une boussole ou de la limaille de fer pour le second). De telles cartes concrétisent la présence d'un champ en tout point de l'espace et permettent de mieux comprendre le rôle d'intermédiaire que joue un champ dans une interaction (par exemple, la Terre crée un champ gravitationnel en tout point de son voisinage, et ce champ agit sur les pommes d'un verger).

2.8 Onde [2.0][2.5][4.6][5.1][6.10][6.11]

- Divers exemples d'ondes.
- Vitesse de propagation.
- Cas des ondes sinusoïdales. Amplitude, longueur d'onde, fréquence.
- Fondamental et harmoniques. .
- Résonance (à partir d'exemples).

- La lumière visible est un exemple très important d'ondes dans un ensemble beaucoup plus vaste. Ces rayonnements se caractérisent par l'étendue de leur spectre de fréquence, depuis les ondes radio jusqu'au rayonnement gamma, en passant par l'infra-rouge, l'ultra-violet et les rayons X.

- La propagation d'une onde à la surface de l'eau n'entraîne pas de déplacement de liquide dans la direction de propagation de l'onde, comme cela est mis en évidence par un corps flottant (bouchon, bateau). Mais toute onde (sonore, lumineuse, radio, à la surface de l'eau...) qui se propage est accompagnée d'un transport d'énergie.

- Les notes de la musique sont des exemples d'ondes sinusoïdales.

- Les ondes sonores générées par des instruments de musique (flûte, guitare, tambour...) ou par les cordes vocales permettent d'aborder la notion de vibration résonante (colonne d'air, corde tendue, peau d'un tambour).

- *Exemples pratiques : la houle par mer belle ou les 'ronds' que l'on voit grandir lorsqu'une pierre tombe dans un plan d'eau calme donnent des images de ce qu'est une onde.*

- *Le rayonnement lumineux se prête à de nombreuses expériences.*

2.9 Ordre/désordre [1.5][1.6]

- Exemples de systèmes ordonnés/désordonnés.
- Transition d'un système d'un état ordonné (par ex. un cristal) vers un état désordonné (par ex. un verre) et vice-versa. Fusion d'un cristal et cristallisation.

- L'importance de ces notions tient (1) au fait que les propriétés d'un système comportant un grand nombre de composants (atomes, molécules, ions...) sont parfois très différentes selon que le système est ordonné ou ne l'est pas, et (2) au fait qu'un système ordonné tend à évoluer vers un état qui l'est moins (mais encore faut-il bien préciser dans quelles conditions). En particulier, une telle évolution prévaut toujours dans le cas d'un système isolé : son *entropie* augmente.

- *Défilé militaire du 14 juillet par opposition à une foule dans une rue piétonne. Tas de briques (en vrac) par opposition à un mur de briques. Cartes du jeu des sept familles avant la partie et en fin de partie. Quartz par opposition à de la silice vitreuse (tous deux composés de dioxyde de silicium).*

- *Fusion/cristallisation de cristaux de neige.*

- *Propriétés comparées du graphite d'une mine de crayon et d'un diamant (tous deux étant composés de carbone pur).*

- *Un tas de briques 'en vrac' résiste moins bien à la pression exercée par un objet lourd déposé sur lui qu'un pilier construit en ordonnant les briques.*

- *La façon dont une goutte de vin rouge délicatement déposée à la surface d'un verre d'eau 'envahit' peu à peu tout le volume d'eau est un exemple de l'évolution spontanée d'un système vers un état de moins en moins ordonné.*

2.10 Information [3.4][3.5][6.13]

- Signal, bruit.
- Signal analogique, signal numérique.
- Codage, stockage.

- Les notions de signal et de bruit sont génériques ; elles sont utilisées dans des domaines très divers (communications radio, TV, photographie, astronomie...). Le 'signal' est l'information (de quelque nature que ce soit) que l'on collecte, transmet ou détecte. Le 'bruit' est constitué par toutes les distorsions/additions/pertes qui détériorent le signal et font perdre tout ou partie de l'information dont il est porteur.

- On peut définir un volume d'information, les conditions de transfert de cette information et les pertes induites. Des informations sont dites 'cryptées' lorsqu'elles sont codées de façon volontairement très complexe, en général en faisant appel à des algorithmes mathématiques (cf. 6.14).

- L'audition de messages transmis par haut-parleur dans un hall de gare fournit souvent un exemple de 'signal' accompagné de 'bruit'. L'information portée par le signal sonore peut être le numéro d'un train et son heure d'arrivée, etc., le bruit peut avoir pour origines les défauts de l'amplificateur audio, son mauvais réglage, des échos.. etc. Le 'bruit' dans un appareil photographique numérique provient essentiellement de l'agitation thermique des électrons du CCD (charge-coupled device) qui capte l'image : certains de ces électrons viennent s'ajouter à la charge électrique accumulée dans chacun des pixels du CCD par suite de l'éclairement (le signal) du CCD. Il en résulte une réduction de la netteté de l'image.

- Information transmise par le langage ; richesse du vocabulaire.*
- Quantité d'information contenue dans le génome humain.*
- Codes morse, braille. Codage informatique, génétique.*
- Transmission de l'influx nerveux : neurones.*
- Transfert d'information génétique (réplication des ADN).*

Chapitre 3

Spécificités du monde vivant

Ce chapitre doit fournir les bases pour comprendre les recommandations en matière de sexualité, de santé et d'environnement, mais en distinguant bien le 'scientifique' du 'social'.

3.1 Organisme vivant [4.3*][1.3][3.3][3.4][3.5]

- Qu'est-ce qu'un organisme vivant? Caractères fondamentaux de la vie : composition chimique (eau, composés carbonés), enveloppe (membrane, peau, écorce...), échanges avec l'environnement, métabolisme, reproduction (transmission du patrimoine génétique), évolution, communication, différenciation.

- La cellule, structure de base du monde vivant.
- Les organites intracellulaires (noyau, mitochondries, chloroplastes).
- Développement (embryogenèse) des organismes vivants.
- Les organes ; leurs 'fonctions'.
- Les hormones.

- Les organites intracellulaires sont des structures présentes à l'intérieur des cellules eucaryotes – cellules ayant un noyau cellulaire bien visible – responsables de différentes fonctions cellulaires. Par exemple, les mitochondries sont en charge de l'essentiel de la production d'ATP, la molécule porteuse d'énergie au sein du monde vivant. Certains organites sont les restes d'anciens organismes symbiotiques.

- Les organismes multicellulaires se développent à partir d'une cellule unique, la cellule-oeuf. Certains gènes, appelés 'gènes architectes', tels les gènes homéotiques, ont un rôle majeur dans ce processus qui implique l'acquisition d'une forme (morphogenèse) et la différenciation des cellules.

- Les hormones sont des molécules de natures chimiques différentes, fabriquées par une partie de l'organisme, et agissant sur une ou plusieurs autres parties. Les hormones participent à la régulation des processus biologiques: par exemple, les hormones sexuelles interviennent dans le contrôle de la reproduction

- Exemples illustrant la diversité des organismes vivants, incluant les bactéries, algues, coraux, champignons, lichens..., tout en précisant ce qu'ils ont en commun en tant qu'organismes vivants.

3.2 Espèce biologique [4.2][3.4]

- Populations.
- Interfécondité, descendance viable et féconde.
- Unicité et diversité des individus qui composent l'espèce humaine.

- Les organismes asexués.
- Dans une vision évolutive du monde vivant, la notion d'espèce est un concept difficile à définir. Selon les approches, il existe différentes notions d'espèces.

3.3 Métabolisme [1.3][1.5][2.5]

- Processus de dégradation et de synthèse dans les cellules.
- Organismes autotrophes et hétérotrophes.
- Différences entre animaux et végétaux.
- Les enzymes : catalyseurs du monde vivant.
- Besoins/dépenses énergétiques du corps humain.
- Notion de vitamine.
- Alimentation et besoins du corps humain, valeur nutritionnelle des divers aliments.

- Un organisme hétérotrophe a besoin pour sa croissance de molécules fabriquées par d'autres organismes vivants. Un organisme autotrophe n'a besoin que d'une source d'énergie et de composants minéraux présents dans l'environnement.

- Une vitamine est une molécule fabriquée par certains organismes et nécessaire à la croissance d'autres organismes incapables de la synthétiser. Les vitamines agissent comme coenzymes.

3.4 Reproduction des êtres vivants [4.3*][1.4][2.10][3.1][3.2][3.5]

- Reproduction sexuée. Diverses étapes/produits : méiose (division des cellules germinales chez les eucaryotes), gamètes (cellules reproductrices), fécondation, cellule-œuf.
- Chromosomes/nucléosomes/ADN.
- Réplication de l'ADN, transcription des gènes.
- La reproduction d'un organisme consiste principalement en la transmission de son matériel génétique à ses descendants.
- Un nucléosome est la structure formée par un fragment d'ADN d'environ 150 paires de base et huit protéines appelées 'histones'.

3.5 Hérité et variabilité [4.3*][2.10][3.1][3.4]

- Transmission des 'caractères' entre générations : expériences de Mendel.
- Mutations et modifications du patrimoine génétique.
- Rôle des mutations dans l'évolution.
- Les expériences/observations de Mendel permettent d'introduire les notions de caractère *dominant* et de caractère *récessif*, puis la notion de gène, sans qu'il soit nécessaire pour cela d'explicitier les trois lois de Mendel.

3.6 Macromolécules biologiques [1.4]

- Les macromolécules du vivant sont des polymères formés par l'enchaînement de molécules de plus petite taille.
- Structure des protéines ; les acides aminés.
- Changements de conformation et fonctions des protéines : transporteurs, récepteurs, catalyseurs (enzymes), etc.
- Lipides formés d'acides gras et d'alcools.
- Polysaccharides formés de monosaccharides (oses).
- Polynucléotides : ADN, ARN ; nucléotides.
- Les polymères monotones servent de réserve d'énergie (glycogène) ou ont un rôle structural (cellulose). D'autres polymères du vivant ont des structures variables et des fonctions diverses (protéines, lipides, acides nucléiques).

- Exemples d'acides nucléiques : ADN, ARN messenger, ARN de transfert, MicroARN.

Chapitre 4

Systèmes et leur dynamique

4.1 Les 'systèmes'

- L'expérimentation ou l'observation isolent des 'systèmes' pour les étudier et les décrire.
- Un système peut être (approximativement) 'fermé', ou isolé, par rapport à son environnement extérieur. Il peut être 'ouvert' avec des échanges importants avec celui-ci.
- Frontières, composants, interactions entre composants.
- Équilibre statique/dynamique.
- Cycles.
- Évolution réversible/irréversible.
- Le caractère général de ces notions peut être dégagé progressivement de l'étude de cas particuliers proposés plus haut (par exemple, les réactions chimiques) ou plus bas (les écosystèmes).

4.2 Modèle/modélisation [4.4]

- Un *modèle* est en général une description simplifiée d'un système trop complexe pour que l'on puisse prendre en compte tous les effets qui interviennent dans son fonctionnement ou son comportement.
- La biologie fait appel à des *systèmes modèles* qui permettent d'étudier de manière simple, au laboratoire, des phénomènes complexes.
- Une *modélisation* comprend la construction *et* la validation d'un modèle.
- Il y a lieu de s'assurer que les simplifications adoptées ne biaisent pas les études que l'on se propose de faire avec le modèle utilisé.
- Vu les simplifications apportées, tout modèle a *un domaine limité de validité* qui lui est spécifique et qu'il faut préciser.
- Les différents modèles de l'atome montrent l'évolution de notre connaissance de la structure interne de cet objet microscopique.
- *Toutes disciplines scientifiques! Exemples : modèle de l'atome, d'écosystèmes, modèles utilisés en chimie de synthèse, pour la recherche de nouveaux médicaments.*
- *Le climat fait intervenir un si grand nombre d'éléments (océans, atmosphère, calottes glaciaires, forêts, aérosols...) et d'effets physiques ou chimiques que seules des modélisations numériques peuvent être développées pour analyser/prédire son évolution.*
- *'Systèmes modèles' en biologie : cellules mises en culture pour étudier le métabolisme, organismes se reproduisant rapidement (par ex. les mouches drosophiles) pour étudier les mécanismes de l'hérédité.*

4.3 Mécanisme

- En science, un *mécanisme* est, en général, une séquence de processus qui, s'enchaînant par des liens de cause à effet (par analogie aux rouages d'une horloge), permettent d'expliquer une observation ou un phénomène.

- Comme son nom l'indique, l'origine de ce concept est la mécanique (cf. le mécanisme d'une horloge), mais son usage s'est étendu – avec des sens parfois un peu différents – à tous les domaines scientifiques et au-delà (ex. : mécanisme financier).

- Les modèles *mécanistes* ont une place importante dans les explications de phénomènes biologiques.

- *Nombreux secteurs scientifiques : biologie (ex. mécanismes de défense immunitaire, mécanismes de l'évolution), chimie (ex. mécanismes réactionnels), physique (ex. mécanismes régulateurs/amplificateurs).*

4.4 Simulations numériques [4.2]

- La description de nombreux systèmes ou phénomènes se prête à des simulations numériques.

- Discrétisation, Pixellisation.

- 'Discrétiser' consiste à remplacer une grandeur variant continûment par une autre ne prenant que des valeurs prédéfinies sur lesquelles un ordinateur peut effectuer des calculs. La pixellisation est le remplacement d'une image 'continue' par une matrice de points qui peut être traitée par ordinateur.

- Imagerie.

- *Tous les domaines. La plupart des modèles sont exploités à l'aide de simulations numériques.*

- *Exemples de systèmes ou de dynamiques étudiés sur la base de simulations numériques : fonctionnement d'une centrale nucléaire, comportement d'un bâtiment lors d'un séisme, évolution du climat.*

- *Images de synthèse 2D ou 3D, animations, jeux vidéos.*

4.5 Contrôle des systèmes

- Action, réaction, rétroaction (contre-réaction).

- La stabilité d'un système est souvent assurée par des boucles de contrôle. En général, la 'conduite' de systèmes fait intervenir de nombreux éléments de contrôle.

- *Exemples : thermostat, régulateur de vitesse (automobiles).*

- *Régulation de la concentration de sucre dans le sang, de la température du corps, régulation hormonale.*

- *Exemples de systèmes complexes qui nécessitent une 'conduite' : réacteur nucléaire, unité de production chimique, réseau informatique.*

4.6 Phénomènes de transport au sein de systèmes physiques [2.5][2.6][2.8][5.1]

- Transport de matière ; diffusion.
- Transport de chaleur ; conductibilité thermique.
- Transport d'électricité ; conductibilité électrique.
- Transport d'énergie par une onde (sonore ou lumineuse).

Chapitre 5

La Terre dans le système solaire

Le Soleil est une étoile 'banale'. La fréquence, dans la Voie Lactée, des systèmes planétaires comprenant une planète comparable à la Terre n'est pas encore bien établie. Nous avons besoin de repères relatifs aux propriétés du système solaire et de la Terre, car ce sont des systèmes qui nous concernent très directement.

5.1 Le Soleil [4.1*][2.4][2.8][3.3][4.6]

- Composition, dimensions. Température du cœur où s'effectuent des réactions nucléaires (~15 millions de degrés) et température de la surface (~6 000°).
- Le 'spectre' du rayonnement solaire (sa composition en termes de couleurs) nous informe sur la température de la *surface* du Soleil et sur la composition de celui-ci.
- Le rayonnement solaire nous transfère de l'énergie : il 'chauffe' la surface de notre planète.
- Le rayonnement solaire contribue à des réactions de photosynthèse sur toute notre planète. Ces réactions permettent aux plantes de croître.

- Le spectre du rayonnement solaire s'étend au delà de la partie visible : il comprend des rayonnements invisibles tels que le rayonnement infrarouge et le rayonnement ultraviolet.
- La puissance du rayonnement solaire qui atteint la Terre est de quelques centaines de Watt par m² *en moyenne*, mais tout n'est pas absorbé ; environ 1/3 est renvoyé vers l'espace par l'atmosphère (nuages compris).
- La photosynthèse est un processus qui transforme de l'énergie lumineuse en énergie chimique. Elle permet par exemple aux organismes autotrophes (cf. 3.3) de fabriquer des substances organiques à partir d'eau et des sels minéraux.
- La vie sur Terre dépend de la photosynthèse.

- *La lumière blanche du Soleil peut être décomposée en couleurs à l'aide d'un prisme de verre.*

5.2 La Terre [3.5*][4.2*][2.1][2.7]

- Dimension, méridiens, parallèles.
- Structure et composition interne de la Terre. Champ magnétique terrestre.

- Dérive des continents (tectonique des plaques).
- Courants océanographiques et atmosphériques.
- Changements climatiques
- Les échanges (thermiques, gazeux...) qui s'établissent entre continents, océans et intérieur de la Terre.
- *Carte de la Pangée avant sa fragmentation, il y a ~200 millions d'années.*
- *La description des changements climatiques peut être illustrée sur les 100 000 dernières années.*

5.3 Écosystèmes [4.3*]

- Divers exemples à diverses échelles.
- Biocénose, biotope.
- Échanges prenant place entre les composants du système.
- Facteurs d'équilibre, de déséquilibre. Prédateurs et proies. Chaîne alimentaire.
- Impact humain sur la biodiversité.
- Le concept d'écosystème intervient dans de nombreuses branches des sciences de la vie et de la Terre.
- Une 'biocénose' est l'ensemble des organismes vivants qui coexistent dans un espace donné, appelé 'biotope'.
- *Exemples : mare, forêt, bassin maritime, savane, forêt équatoriale.*

5.4 Ressources naturelles et activités humaines [3.3*][4.3*][2.5]

- L'eau – l'énergie – l'alimentation – la population.
- Inventaire des secteurs critiques : utilisation des sols, épuisement de certaines ressources, réduction de la biodiversité.
- Recyclage.
- Energies fossiles versus énergies renouvelables.
- Evolution des sociétés humaines : du nomadisme à la société industrielle, du troc à la mondialisation.
- La science et la technologie modernes et les transformations du monde.
- Recherche, innovation, invention, production.

Chapitre 6

Concepts et outils mathématiques

Les mathématiques sont d'abord une science, mais une partie du langage mathématique est utilisée dans la vie pratique et dans l'ensemble des autres sciences. Les rubriques ci-dessous ont donc pour certaines un rôle 'd'usage', d'autres sont plutôt une initiation très limitée au regard de concepts importants en mathématiques. La capacité des objets

mathématiques à décrire les objets physiques et leurs propriétés est à l'origine de nombreuses réflexions d'ordre philosophique. « Ce qui est incompréhensible, c'est que le monde soit compréhensible », Albert Einstein.

6.1 Démonstration [6.14]

- Le mode particulier de validation en mathématique n'est pas la vérification expérimentale, mais la démonstration.
- La pratique de différents types de démonstrations mathématiques est une initiation à la logique et au raisonnement : rigueur des propositions et de leur enchaînement, importance de l'ordre des propositions. Un exposé mathématique ordonne les propriétés d'un objet de façon à ce qu'elles s'enchaînent logiquement, bien que les points de départ, définitions et axiomes, ne soient pas nécessairement les propriétés les plus immédiates : on ne voit pas le centre d'une sphère, mais on comprend la définition d'une sphère par son centre et son rayon.
- Le raisonnement intervient au passage de l'observation à l'abstraction dans l'ensemble des sciences, mais aussi dans la vie courante sous une forme intuitive.

6.2 La maîtrise du 'calcul' [6.4][6.6]

- Savoir compter, pratiquer les quatre opérations, manipuler les fractions ou les règles de proportions, ce que l'on appelait la règle de trois, sont des exigences introduites dans l'enseignement élémentaire il y a plus d'un siècle. Cela reste indispensable aussi bien à la vie courante qu'à l'initiation aux sciences.
- La pratique du calcul mental permet d'acquérir des automatismes, synonyme de gain de temps, et développe une compréhension intuitive des ordres de grandeur.
- Notion et usage du 'pourcentage'.

6.3 Ensembles [6.4]

- Éléments de la théorie des ensembles : partie, union, intersection, complémentaire, différence symétrique, (cardinal).
- Les notions de base et les opérations les plus simples de cette théorie trouvent d'innombrables applications qui lui confèrent un caractère d'universalité.

6.4 Les nombres et leur représentation [6.2][6.3][6.5][6.6]

- Les nombres sont partout, généralement écrits dans le système décimal (à base 10), qui utilise les chiffres de 0 à 9.
- Les nombres entiers permettent de compter des objets distincts, les nombres réels de mesurer des quantités continues, telle la distance d'un point à un autre. Remarquons que si on distingue les nombres rationnels et

irrationnels parmi les nombres réels, c'est simplement parce que les premiers peuvent s'exprimer en rapport de deux entiers. Une interprétation littérale du langage pourrait laisser penser que les nombres irrationnels, de même que les nombres complexes ou imaginaires introduits par les mathématiciens et si utiles en physique par exemple échappent à la raison. Sur un autre plan, le terme de chiffre est trop souvent utilisé pour désigner un nombre dans le langage courant.

- La suite des nombres entiers 0, 1, 2, etc. est illimitée et donne un premier exemple d'un ensemble infini dénombrable. D'autres ensembles infinis, tels l'ensemble des points d'un segment de droite ne sont pas dénombrables.

- Les nombres peuvent aussi être écrits dans d'autres systèmes de numérisation : le système à base 2 utilisé dans les machines à calculer n'utilise que les chiffres 0 et 1 auxquels on fait correspondre deux états bien distincts d'un système physique simple, par exemple un conducteur parcouru, ou non, par un courant électrique.

6.5 Représentation de grands et de petits nombres [3.5*][6.4]

- La combinaison d'un nombre décimal avec une puissance de 10 (10^n , avec n entier positif, négatif ou nul) permet une écriture compacte éliminant les chiffres non significatifs à un degré d'approximation choisi.

- Le système métrique a introduit les préfixes milli, centi, déci, deca, hecto, kilo pour les puissances de 10^{-3} à 10^3 . Préfixes pico, nano, micro milli, kilo, méga, giga, téra pour les puissances de mille de 10^{-12} à 10^{12} .

6.6 Inégalités et approximations [3.4*] [6.2]

- Signes $<$ et $>$ indiquant une inégalité.

- Utilisation d'approximations lorsque la précision est inutile à l'utilisation du résultat d'une mesure. L'approximation est utile en science expérimentale, si elle est maîtrisée en fonction de l'usage que l'on souhaite faire de la quantité 'approchée'.

- La capacité de faire de 'bonnes' approximations se développe, en particulier, par les travaux pratiques.

- *Valeur approchée du nombre pi.*

- *Division plus ou moins poussée.*

- *Recherche de la valeur du côté d'un carré d'aire donnée. Peut-on trouver un rectangle d'aire et de périmètre donnés ?*

6.7 Relation entre nombres et géométrie [6.8][6.10]

- Le triangle rectangle dont la longueur des côtés est proportionnelle à 3, 4, 5 est connu depuis l'Égypte ancienne et utilisé par les maçons.

- On peut repérer un point du plan par un couple (x et y) de nombres réels. Si y est une fonction de x, la représentation graphique est une courbe. Des

questions de géométrie (détermination des tangentes à une courbe, calcul des longueurs et des aires) deviennent des questions d'analyse. On peut transposer à x,y,z dans l'espace.

6.8 Figures géométriques et leurs transformations [1.4][6.7]

- En géométrie plane, les figures fondamentales sont les triangles : la somme des angles d'un triangle est un angle plat (180 degrés). Cette proposition repose sur le postulat d'Euclide.

- Propriétés de quelques figures dans le plan : triangles, quadrilatères, carrés, cercles. Certaines figures de représentation moins immédiate sont très importantes, par exemple les ellipses (en astronomie) ou les paraboles (en mécanique).

- Propriétés de quelques figures ou objets dans l'espace. Cubes, sphères, cylindres.

- Agrandissement et réduction ('homothéties').

- Isométries : translation, rotation, symétrie. Ces modes de transformation des figures qui conservent les longueurs jouent un rôle important notamment en physique.

- La géométrie d'Euclide est incorrecte sur la sphère ou une surface à courbure négative : on la remplace alors par des géométries dites 'non euclidiennes' qui ont de nombreuses applications.

- Les règles respectées lors de transformations isométriques permettent d'approcher concrètement la notion mathématique de 'groupe'.

- Les figures géométriques offrent la possibilité d' 'enchaîner' des théorèmes (par ex. : lieu des points équidistants de deux points donnés, croisement des médiatrices des côtés d'un triangle quelconque, position du centre du cercle circonscrit à un triangle rectangle).

- *Les figures géométriques offrent aussi la possibilité d'une 'expérimentation' (avec règle et compas) pour 'découvrir' les théorèmes de Thalès ou de Pythagore par exemple, ou de réaliser des plans ou des maquettes à diverses échelles. Construction d'un cercle comme limite d'un polygone.*

- *Des exemples de symétrie peuvent être pris d'abord dans la Nature : fleurs, cristaux..., puis en architecture, mathématiques, physique, chimie et biologie moléculaire.*

6.9 Expressions littérales

- Attribution de lettres/noms à des nombres relatifs.

- Calcul d'expressions littérales.

- Equations du premier degré.

- Identités remarquables.

- *La représentation de nombres relatifs par des lettres, puis l'apprentissage des opérations d'addition, soustraction, multiplication d'expressions littérales, et enfin la construction d'identités remarquables (par ex. $(a+b)(a-b) = a^2 - b^2$) qui sont satisfaites quelles que soient les valeurs numériques attribuées aux lettres, développent les capacités d'abstraction.*

6.10 Les fonctions et l'analyse [2.8][6.7][6.11]

- La notion de fonction est très générale. La représentation par des droites des fonctions linéaires ($y = a x$) ou affines ($y = a x + b$), ou celle des polynômes du second degré ($y = ax^2 + bx + c$) par des paraboles doivent être familières. Il est bon d'avoir au moins une idée de l'allure des exponentielles que l'on rencontre aussi bien en physique qu'en économie et de connaître celle des sinusoides qui permettent de décrire nombre de phénomènes d'oscillation (les vagues).

- La recherche de solution(s) à une équation simple est une initiation à 'l'analyse' qui a pour objet l'étude et la manipulation des fonctions. Beaucoup de problèmes d'analyse ont été ou sont posés aussi bien par les sciences expérimentales, la mécanique en particulier, que par la géométrie ou les probabilités. Réciproquement, les sciences expérimentales ont impérativement besoin des solutions qu'apportent les mathématiques.

- Certaines notions, comme celle de dérivée ou d'intégrale, peuvent être abordées de manière pratique, à partir d'exemples pris dans différentes disciplines.

- Le domaine fermé ou ouvert d'existence d'une fonction est important : les températures sont définies sur un intervalle ouvert, le zéro absolu est une limite inaccessible, de même le temps zéro du *big bang*.

- *Exemples illustrant la notion de limite : limites d'une variation exponentielle, limites de l'inverse d'un nombre quand ce nombre devient de plus en plus grand ou de plus en plus petit.*

6.11 Fonction périodique [2.1][2.8][6.10]

- Processus répétitifs réguliers. Cas des processus strictement périodiques.

- Amplitude, période, fréquence.

- Les fonctions périodiques ont une grande importance pratique, notamment mais pas seulement pour la mesure du temps.

- *Exemples : battements du cœur, courant alternatif, mouvements de la Terre et de la Lune... Les exemples en musique (son) et en optique (couleur) permettent d'introduire la notion de spectre.*

6.12 La statistique et les tableaux numériques [3.4*]

- La statistique est la science du traitement raisonné des données numériques, qu'il s'agisse des résultats d'expériences ou d'observations avec les erreurs qui leur sont associées ou de toutes sortes de données concernant la vie sociale et économique. L'apprentissage de la statistique doit aiguïser le regard critique qui doit être porté sur les résultats offerts sans explications suffisantes à la consommation des citoyens.

- Le choix de variables pertinentes est essentiel pour la création d'un tableau numérique exploitable. Certains tableaux peuvent collecter des données

purement descriptives. On y trouve plus souvent, sans que cela soit toujours précisé, des moyennes résultant de séries de mesures ou d'échantillonnages. Il faut alors pouvoir apprécier le niveau de validité (variance ou carré de l'écart-type caractérisant la dispersion des résultats de mesures répétées) de ces moyennes en fonction de leurs conditions d'obtention.

- Description d'une série statistique. Fréquence.
- Représentations graphiques : histogrammes, courbes.
- Moyenne, médiane, dispersion et écart-type (ou écart quadratique moyen).
- Notion de corrélation entre deux variables.

- L'objectif de toute analyse statistique doit être clairement explicité, cas par cas.
- Applications pratiques à la démographie, l'épidémiologie, l'économie.

6.13 Modélisation de l'aléatoire [2.6][2.11]

- De nombreux phénomènes dépendent du hasard et sont alors qualifiés d'*aléatoires* : les séquences obtenues dans le jeu de pile ou face en donnent un exemple.
- Le mouvement brownien est un mouvement de petites particules, (*pas* de molécules). Cette marche au hasard est décrite par une fonction aléatoire, analogue à celle qui est à l'origine de la diffusion.
- Notion de probabilité à travers des exemples.
- Loi de probabilité *normale* (ou *gaussienne*).
- Intervalle d'erreur.

- Il est souvent fait appel à la loi de probabilité 'normale' mais elle ne doit pas être utilisée sans précaution. Si elle décrit approximativement un grand nombre de distributions *au voisinage de leur maximum* (âge d'une population, nombre d'hématies (globules rouges) par mm³ d'une population, température à midi en été dans une région donnée...), la loi normale présente parfois des écarts extrêmement importants par rapport à une distribution observée dans les 'queues' de la distribution, c'est-à-dire dans les domaines où la fréquence est (très) faible (*exemples : distribution de la magnitude des crues d'une rivière, des tremblements de terre, des tsunamis*).

- Des termes aléatoires interviennent souvent lorsqu'un signal (électronique par exemple) est perturbé par un 'bruit'.

- *Jeu avec un dé, décroissance radioactive, si possible film sur le mouvement brownien.*
- *Physique (radioactivité, diffusion), biologie (probabilité de mutation d'une base dans l'ADN).*

6.14 Logique, algorithmes et informatique [6.1][6.15]

- L'informatique est née de la rencontre entre les 'algorithmes' (construction de chemins logiques pour atteindre une solution) et les machines à calculer contemporaines. Pour appliquer des algorithmes, il faut des langages adaptés à la machine et des langages adaptés à l'utilisateur. Ces langages qui sont différents, obéissent à des règles de fonctionnement logiques. (Les algorithmes permettant aux machines d'effectuer les quatre opérations ne

sont pas simples.) L'amélioration des algorithmes est un enjeu scientifique constant.

- Séquence d'instructions. Embranchements, boucles.

- Un algorithme est 'correct' s'il conduit au résultat désiré quelles que soient les conditions initiales et les circonstances particulières qui interviennent lors de son exécution.

- *Une recette de cuisine (rigoureusement respectée) est un exemple élémentaire, Autres exemples : tris, répondeurs vocaux avec redirection selon une arborescence, dépouillement des scrutins proportionnels. Les 'procédures' de l'aviation (décollage, atterrissage...) peuvent être assimilées à des algorithmes – pas toujours corrects !*

6.15 Arbre, graphe, réseau [6.14]

- Arbre généalogique, de questionnement, de décision.

- Éléments de base des graphes (sommets/noeuds, arêtes, flèches...).

- L'intérêt de ce groupe de concepts résulte de la diversité des exemples auxquels ils s'appliquent.

- *Exemples : labyrinthe, ponts de Königsberg, transports, circuits électriques, système/réseau sanguin, réseau de neurones.*