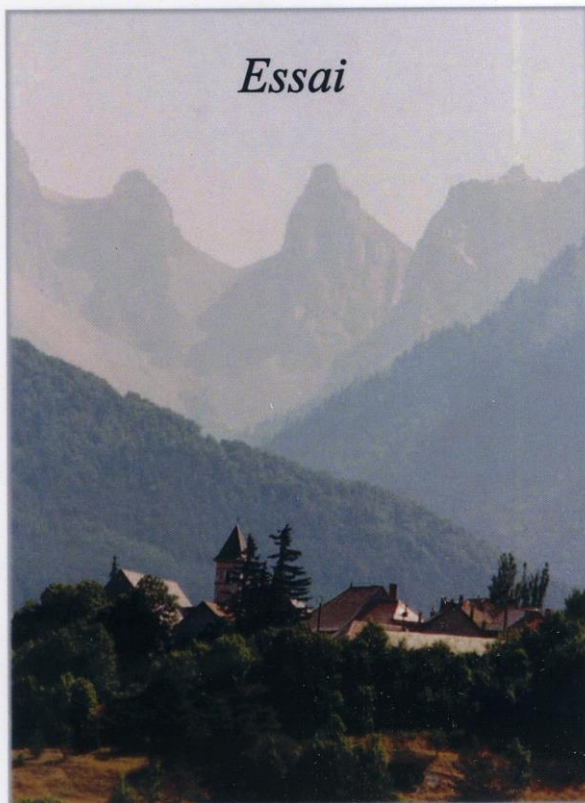


Gilbert RUELLE

Questions durables

Essai



Éditions
Baude(aire

Quatrième de couverture

Les questions durables sont celles que se posent les hommes depuis longtemps, sans être encore totalement satisfaits des réponses. Ce sont aussi celles de l'adolescent qui cherche ses repères dans l'environnement spatial, temporel et matériel il s'est trouvé parachuté, avant que les activités de l'âge adulte ne viennent souvent gommer l'acuité de ces questionnements juvéniles.

La science, utilisant l'observation et la logique de causalité, a donné des réponses à certaines de ces questions en apportant des connaissances là où il y avait plutôt des croyances. Mais face à l'évolution d'un univers initialement uniforme vers la complexité, la vie et sa diversité, la pensée, avec d'étranges concepts associés à la vie comme la beauté, la seule logique de causalité de la science perd un peu pied.

Pour les uns, le caractère néguentropique de ces structures,, même si elles ne sont que temporaires, évoque plutôt une finalité, mais la finalité ne fait pas partie de la boîte à outil de la science. Pour d'autres il ne s'agit que d'un titanesque et absurde jeu de hasard.

Trois jours de randonnées dans les montagnes entourant le village de Lus la croix haute. Trois étudiants et un professeur d'université en vacances d'été. Trois soirées et trois longues pauses où ces questions durables émergent comme sujet d'une sorte de séminaire d'été qui encourage la culture scientifique dont les réponses sont souvent plus étonnantes que la science-fiction.

L'auteur : Gilbert Ruelle , ingénieur, ancien d'ALSTOM (branche énergie), où il fut Directeur des alternateurs des centrales électriques hydrauliques, thermiques et nucléaires, ainsi que des applications de la supraconductivité. Membre de l'Académie e des technologies, y a animé la commission "Energie et changement climatique" de 2000 à 2008.

QUESTIONS

DURABLES

GILBERT RUELLE

Présentation résumée

Selon Montaigne et Wikipédia, cet ouvrage est un essai, c'est-à-dire une œuvre de réflexion exposée de manière personnelle, voire subjective ou polémique, genre littéraire qui se prête particulièrement à la réflexion philosophique, mais la réflexion est ici plutôt scientifique, sur les progrès et les insuffisances dans le degré de compréhension du monde qui nous entoure, tissé de matière, d'espace, de temps, de vie et de pensée.

Les questions durables sont celles que se posent les hommes depuis longtemps, sans avoir encore pu se satisfaire totalement des réponses. Ce sont aussi celles de l'adolescent dans son éveil intellectuel, qui cherche ses repères dans l'environnement spatial, temporel et matériel où il s'est trouvé parachuté, avant que les activités de l'âge adulte ne viennent souvent gommer l'acuité de ces questionnements juvéniles.

La science, avec ses outils que sont l'observation et la logique de causalité, a proposé des réponses à beaucoup de ces questions en apportant des connaissances là où il y avait plutôt des croyances. Ces connaissances nous font découvrir un univers évoluant de son uniformité primitive vers la complexité, la vie et sa diversité, la pensée, avec d'étranges concepts interférant avec la vie comme celui de beauté. Pour expliquer cette évolution, la seule logique de causalité de la science perd un peu pied. Pour les uns, le caractère néguentropique de cette évolution, même si elle n'est que temporaire, évoque plutôt une finalité, mais la finalité ne fait pas partie de la boîte à outils de la science. Pour d'autres il ne s'agit que d'un titanesque et absurde jeu de hasard.

La réflexion commence comme une sorte de jeu de vacances entre trois étudiants au cours d'une randonnée alpestre de trois journées au cours desquelles ces questions émergent pendant les pauses et les soirées, souvent inopinément.

Conscients de la vanité de leurs tentatives d'approche d'un thème aussi ambitieux, ils cherchent plutôt à consolider et affiner leurs connaissances sur les pièces élémentaires du puzzle pour mieux en cerner les limites. La diversité de leurs caractères conduit à la même diversité de leurs questionnements tempérés par leur compagnon de marche, un professeur d'université qui corrige ou complète leurs perceptions personnelles en tentant d'éclairer les domaines moins connus d'eux de la relativité, de la physique quantique, avec son principe d'incertitude et les ondes de matière de de Broglie, de la vision rustique de l'atome à la modélisation standard actuelle des particules élémentaires, de l'entropie, du concept insaisissable de force, des symétries engageant les lois de conservation, de l'astrophysique..etc.

Ces débats juvéniles sur les dimensions du temps et de l'espace, sur le concept de beauté et son rôle dans les phénomènes de la vie, ainsi que sur l'aspect néguentropique de ceux-ci, sont pour le moins rafraichissants. N'ayant pas "froid aux yeux", ils n'évitent pas le débat sur les grilles de lecture religieuses du monde.

Cet essai en forme de séminaire d'été constitue un plaidoyer pour la culture scientifique dont les réponses évolutives à ces questions durables sont souvent plus étonnantes que la science-fiction.

Cet essai scientifique permet deux niveaux de lecture :

Le lecteur pressé peut, au moins en première lecture, sauter les passages en petits caractères qui demandent un peu plus d'attention et de connaissances scientifiques. Ceux qui souhaitent approfondir pourront s'y reporter en seconde lecture.

Les chapîtres

Chapitre 1: Mise en place des personnages, le professeur Kirgard et les trois étudiants Noël, Robin et Grisella. Première nuit sous un ciel étoilé, vue sur le cosmos et la connaissance scientifique de son histoire.

Chapitre 2: Sur un mur d'ammonites, débat sur les perceptions du temps et l'espace-temps, de Newton à Einstein. Constance de la vitesse de la lumière dans tous les référentiels. Variation de l'écoulement du temps avec la vitesse relative des référentiels. Diagramme de Minkowski. Variation de la masse apparente avec la vitesse, vitesse de la lumière indépassable. Courbure de l'espace-temps avec la matière/énergie, géodésiques d'espace-temps remplaçant l'attraction universelle de Newton. La matière/énergie dicte sa loi à l'espace-temps en le déformant et l'espace-temps dicte à la matière comment elle doit se mouvoir. Abolition de la distinction newtonienne entre le contenant et le contenu, les propriétés du contenant dépendant du contenu.

Chapitre 3: Pourquoi l'espace a-t-il 3 dimensions? Y avait-il d'autres possibilités? Réflexions historique et philosophique sur la diversité de la matière inerte et l'hyperdiversité de la matière vivante.

Chapitre 4: Regard sur cette matière sous le couteau de Démocrite. Les images successives de l'atome. Les quarks. Les forces internes à l'atome. Le modèle "standard" des particules. Le neutrino. Bosons et Fermions, interactions. Les familles de particules historiques et préhistoriques. Spin, principe d'exclusion de Pauli. Vacuité de la matière. Les charges, les couleurs des quarks. Le boson de Higgs.

Chapitre 5: Révision des points essentiels de la physique quantique. Les échecs du bon sens. Les aspects corpusculaire et ondulatoire. Mystère des deux fentes. Relation d'incertitude de Heisenberg et ses conséquences sur la frénésie de mouvement des particules les plus petites; l'étonnement de Born. Conception particulière des actions, l'unité d'action étant la constante de Planck. Les ondes de matière de de Broglie, de longueur d'onde $\lambda = h / p$, première relation entre grandeurs corpusculaire et ondulatoire. Application du principe d'incertitude au couple énergie-temps, irruption du discontinu dans les interactions. Introduction aux particules virtuelles. Emprunts d'énergie au vide quantique. La négation du principe de conservation de l'énergie pour les temps très courts. Cosmologies issues de la physique quantique. Les doutes d'Einstein sur la physique quantique, le paradoxe EPR., victoire des iconoclastes de Copenhague.

Chapitre 6: Les difficultés du concept de force. Amplitudes et rayons d'action des 4 forces de la nature: "force forte" à l'intérieur du noyau, force électrique entre noyau et électrons, force "faible" changeant la couleur des quarks, force de gravité la plus faible de toutes mais la première perçue. Le génie de Newton et ses limites. L'abstraction de la force et ses images. Les particules virtuelles vecteurs de force? La force faible assassine de la matière. Introduction aux symétries et aux lois de conservation. Les viols de symétrie du neutrino.

Chapitre 7: Orage en montagne, déprime du professeur Kirgard, Que signifie "comprendre". La réalité (si elle existe) et ses apparences (la caverne de Platon). Refus de la philosophie stérilisante de Wittgenstein au profit de celle de Feinman, et pourtant désespoir du peintre de la nature. Voltaire et les grilles de lecture religieuses; empreinte des diverses religions. La mort, cynisme de Robin et ouverture de Noël. L'explication du monde par le hasard et la nécessité est-elle plausible, ou est-on tenté d'en appeler à la finalité?

Chapitre 8: Un peu d'astrophysique. Physique de la vie et de la mort des étoiles, matière noire, énergie noire, trous noirs, rayon de Schwarzschild, et figeage du temps. Les planètes et leur diversité, l'étroitesse des conditions permettant la vie.

Chapitre 9: La beauté, maïeutique sur Noël sur le concept de beauté, son inaptitude à faire partie de la boîte à outils de la science, et son rôle pourtant fondamental dans la nature, la vie, la sexualité. Les ruses de la nature et l'égoïsme du gène selon Dawkins.

Chapitre 10: L'entropie, sous toutes ses apparences (Clausius, Boltzman, ordre/désordre, probabilité d'événements), guide-t-elle le monde? ou ne fait-elle qu'accompagner ses phénomènes physiques? Les actes de création, les œuvres d'art, les monuments historiques, les civilisations, les voitures et les ordinateurs sont des réalisations temporaires néguentropique. Le développement de la vie, la croissance de l'embryon jusqu'à l'adulte si complexe et si bien organisé sont des phénomènes si néguentropiques qu'il est tentant de faire appel au concept de finalité plutôt qu'au mécanisme du hasard et de la nécessité pour un tel degré d'organisation intelligente et de complexité. La notion de téléonomie de Jacques Monod est-elle plus acceptable pour remplacer celle de finalité?

Chapitre 11: Et l'esprit qui est l'outil permettant cette analyse, est-il lui-même susceptible d'une analyse plus fondamentale que le repérage des zones du cerveau réactives à telle sollicitation. La tentative extravagante de J-E Charon dans les années 1970/80 est rappelée dans ses grandes lignes (Relativité généralisée avec variable imaginaire, Espace-temps des électrons-trous noirs où réside l'esprit, mémoire universelle qui joue pour la matière inerte aussi bien que vivante le rôle du gène dans la matière vivante). Cet électron pensant, que Charon nomme "éon" a vécu des milliards d'années dans les étoiles, a connu les débuts de notre planète, la naissance de la vie, s'est intégré à de multiples "véhicules", dont l'homme croit être le plus élaboré. L'esprit des éons s'enrichi avec le temps qui passe, vers on ne sait quel point oméga. Le spectacle de ce néo-Teilhardisme scientifique nous est donné depuis le début du monde, l'accouplement des particules les plus élémentaires depuis le Big-Bang pour former les atomes, puis les molécules de plus en plus complexes, les précurseurs de vie, puis le développement de cette vie, du végétal et du virus à l'homme .

Cette idée de localisation de l'esprit dans nos électrons-éons surclasse la science-fiction, et après tout, si on avait annoncé à un homme du dix-neuvième siècle que son plan de fabrication était présent dans chacune des 100.000 milliards de parties infinitésimales de son corps qu'on appelle maintenant l'ADN des cellules, et qu'on pourrait le reconstituer à l'identique à partir d'une seule de ces cellules, il aurait été aussi incrédule que nous pouvons l'être aujourd'hui à l'idée que notre esprit ne serait pas cette émergence indéfinissable apparaissant à partir d'un certain degré de complexité de la matière de notre cerveau, mais serait présent dans les 10^{28} à 10^{30} électrons de notre corps.

Ceci dit, cette théorie sur l'esprit est restée du domaine de la science-fiction et n'a pas connu de développements après la disparition de J-E Charon. Après dix chapitres de science dure et ce onzième de science-fiction, fin de randonnée, retour au bercail après, accueil par les vestales. Et méditation poétique sur la psyché des cailloux du chemin.

Cette randonnée-séminaire d'été n'a évidemment pas permis de déterminer si notre univers a été commis par un accident quantique ou un acte délibéré, mais on s'en doutait un peu, "l'univers est comme un coffre fort à combinaison, dont la combinaison est enfermée à l'intérieur"¹. On peut y préférer la légèreté de Woody Allen: "Can we actually "know" the universe? My God, it's hard enough finding your way around in Chinatown"².

¹ Peter de Vries *let me count the ways* 1965 dans *Science Says* W.H.Freeman New-York 2001

² Woody Allen *Getting Even* 1971 dans *Science Says* W.H.Freeman New-York 2001



Et c'est pour ça que votre fille est

muette

L'orage imprévu du matin avait fait avorter leur projet de randonnée. Robin tuait le temps en explorant la bibliothèque où les polars abondaient. Il préleva un Arthur Upfield, et erra dans les grands espaces australiens en suivant une enquête de l'inspecteur Napoléon Bonaparte.

Grisella n'avait pas fait l'effort de chercher des polars sur les étagères, car il en traînait sur les tables basses de la grande salle, à disposition de tous les membres de la tribu, sauf Noël qui préférait les poèmes. Elle venait de se délecter dans une enquête du commissaire Otani à Kyoto, puis délaissa James Melville pour parcourir un Agatha Christie qu'elle avait déjà lu. Elle alluma la télé par désœuvrement. Un flash d'informations y servait le lot quotidien d'aperçus de l'actualité, la météo dont ils venaient d'éprouver les frasques locales, un attentat islamiste, quelques images d'un mariage homosexuel, un embryon de débat sur l'adoption, trois mots sur le réchauffement climatique dans l'arctique, la routine, quoi !

Noël coupa la télé en grognant "j'ai des envies d'ermitage dans la montagne?", et partit se dégourdir les jambes en faisant le tour des pièces du chalet. Sa petite sœur rêvassait dans sa chambre en regardant la pluie battre les vitres et les éclairs zébrer les nuages noirs. Son petit frère, la cheville bandée suite à une entorse, était vautre sur son lit, plongé comme à son habitude dans une BD de science fiction.

Le coin cuisine fleurait bon les herbes de Provence; les précieuses vestales s'y activaient à terminer la préparation d'un déjeuner à faire oublier le mauvais temps. Pendant les dernières minutes de cuisson, sa grand-mère remit discrètement la télé et zappa sur son jeu préféré pour entretenir ses neurones.

Après le savoureux repas, une somnolence générale les invita tous à la sieste avec ou sans polar, dont ils émergèrent une heure plus tard. L'orage du matin s'était dispersé avec une rapidité surprenante en montagne, les sommets émergeaient déjà de la brume qui avait succédé au chaos de nuages noirs, la tête de Toussière dominait à nouveau le village de Lus comme une apparition vaporeuse sous le soleil retrouvé. Autour de la maison, des guirlandes de perles d'eau scintillaient dans les hautes herbes.

- Le vent a viré au nord, dit Robin, je crois que nous pourrions tenter le départ malgré l'heure un peu tardive.

Une légère brise du nord augurait en effet que cette embellie serait durable. Les sacs à dos étaient prêts depuis le matin, le départ retardé par l'amoncellement de nuages et les grondements de la matinée pouvait être envisagé après cette purge du ciel.

- Les vacances sont courtes, approuva Grisella, chaque demi-journée est précieuse, je vote pour un départ immédiat.

- J'approuve, conforta Noël qui empoignait déjà les bretelles de son sac à dos.

Le professeur Kirgard sortit sur la terrasse, scruta la montagne où les traînées de brume s'évaporaient rapidement, renifla le vent, et opina : Pourquoi pas !

En quelques minutes de joyeuse cavalcade, Kirgard et les trois étudiants rassemblèrent leur équipement dans le coffre de la voiture. Adieux rapides aux précieuses vestales de la maison, recommandations coutumières de prudence, et en route pour le splendide vallon de la Jarjatte, passant l'étroit goulet le long du Buech entre le Pic de l'Aigle et le Roc du Chamousset, qui découvrait à sa sortie la vue sur le Grand Ferrand, enfilade du vallon en longeant ses belles aiguilles encadrées par le Roc de Garnesier et la pointe de Vachère, pour atteindre au fond du cirque le pied des sentiers où la voiture sera abandonnée sous les ombrages.

Les trois jeunes gens s'étaient tous orientés vers des études scientifiques après quelques hésitations, car chacun s'était senti également attiré par d'autres disciplines.

Noël Blanc s'était finalement décidé pour de solides études d'ingénieur. Il aimait les challenges, les mathématiques difficiles, mais aussi la poésie, la musique et même la philosophie, ce qu'il masquait soigneusement sous un dédain apparent, peut-être par pudeur et crainte de s'aventurer sur un terrain où le langage lui semblait parfois faillir à son rôle en manipulant des concepts trop flous. Il était souvent entouré d'une bande de copains et se montrait toujours disponible pour leur rendre service, il ne semblait pas y avoir de place dans son cœur pour un sentiment d'égoïsme.

Robin Noir avait pris la même option, il avait manifesté très tôt de grandes facilités littéraires, puis avait viré vers les sciences et affectait maintenant un mépris pour la philosophie, qui ressemblait un peu en l'accentuant à la pudeur de Noël. A l'instar de beaucoup de jeunes gens de son âge, il se réfugiait souvent dans le cynisme et la dérision comme s'il y trouvait une sorte de protection contre un certain manque de confiance en soi, qui s'exprimait aussi par un constant besoin d'action.

Grisella Nuance, elle, était une jeune fille respirant l'équilibre, dont on se demandait où elle trouvait les ressources pour être aussi compréhensive vis à vis de tous et de toutes les situations sans jamais pourtant être vraiment dupe ni crédule. Riche de beaucoup de possibilités, elle avait hésité entre des études de lettres classiques, d'ingénieur ou de sciences politiques et s'était décidée, presque à pile ou face, avec autant d'attrait que de regret, pour les mathématiques.

Tous aimaient le sport et la montagne qui les rassemblait quelques semaines chaque été dans cette haute vallée ensoleillée des Alpes du sud qu'ils affectionnaient, avec sa végétation de buis, de hêtres, de pins et de lavande sauvage, où ils entreprenaient de longues randonnées dans les cols et les sommets environnants.

Le professeur Kirgard appréciait ces quelques jours de vacances en compagnie des étudiants et de leurs amis. Au cours de cette coupure de l'année universitaire, réunis par un goût commun pour les randonnées en montagne, il pouvait être plus proche d'eux, devant leurs charismes et leurs anxiétés sans pour autant entrer dans une intimité et une familiarité

que ni les uns ni les autres ne souhaitaient. Il aimait le côtoiement de ces esprits jeunes où l’empreinte récente de la découverte de la vie et de la connaissance lui rappelait sans doute sa propre quête exigeante d’intelligibilité du monde lorsqu’il avait leur âge. Il reconnaissait les dominantes de chacun d’eux, sous leurs attitudes souvent détachées.

Derrière le cynisme affecté par Robin Noir et son constant besoin d’action, il devinait quelque désarroi d’avoir côtoyé certaines médiocrités de la vie, qu’il avait fini par prendre en compte telles quelles en affectant ce cynisme protecteur ; il semblait fuir l’émotion et avoir confié les commandes de sa vie à la pensée rationnelle ; peut-être cette dominante avait-elle contribué à le faire basculer d’un fil du côté de ceux que l’on nomme agnostiques, et il cherchait constamment avec intelligence et réalisme les satisfactions personnelles qu’il pouvait raisonnablement tirer de cette vie.

En Noël Blanc, le professeur Kirgard devinait une sorte d’émerveillement permanent devant un monde qu’il jugeait hors d’atteinte de la pensée rationnelle, émerveillement qui l’emportait devant une souffrance qu’il avait dû connaître dans son adolescence par la perte d’un proche. Il était plus enclin à la patience qu’à la révolte, il semblait regarder les hommes avec recul, mais leur portait beaucoup d’attention malgré une apparence de détachement teinté d’humour. Il acceptait le mystère du monde et en quêtait plutôt la beauté dont il percevait des bribes de ci de là.

Le professeur avait un peu plus de difficulté à comprendre Grisella Nuance, peut-être parce qu’il était homme et qu’elle était femme. Il ne saisissait pas bien le parcours intellectuel de cette fille brillante en lettres qui avait opté à pile ou face pour les mathématiques et y brillait autant. Il croyait se souvenir l’avoir entendu dire au cours de vacances précédentes qu’elle n’aimait pas la physique, peut-être la jugeait-elle trop inaccessible à une réelle compréhension, et lui préférait-elle le maniement des objets mentaux bien définis des mathématiques. Excellente pianiste et violoncelliste, en même temps que parapentiste assidue, elle mettait dans ses relations avec les autres une gentillesse et une serviabilité rares.

Le torrent s’était un peu gonflé et avait pris une teinte d’opale après l’orage. Les dernières gouttes d’eau tombaient des arbres dans le sentier dont la pente très raide dès le départ avait réduit les quatre marcheurs au silence pour adapter leur souffle. On n’entendait que le chuintement des chaussures sur les feuilles mouillées, sur un fond de chants d’oiseaux, de bourdonnements d’insectes et de cascades d’eaux vives.

Assez haut dans la forêt, Noël s’écarta un peu du chemin et héla ses camarades pour contempler une magnifique touffe de lys Martagon. Les perles d’eau restées accrochées sur le velours sombre des fleurs rehaussaient leur beauté dans la lumière tamisée de la forêt.

- O.K. ! dit Robin, c’est sans doute de la pure beauté, mais il faut avancer si nous voulons camper ce soir sous le pierrier de la tête blanche.

Après la forêt, les alpages à moutons furent un régal de fraîches odeurs mouillées de fleurs dans le seul bruissement des insectes ; Le roulement du torrent s’était progressivement estompé dans l’éloignement, le soleil déjà bas mais cru frappait la peau et le professeur Kirgard qui transpirait sans se plaindre proposa un arrêt boisson qui fut bienvenu pour tous avant la longue marche d’approche vers le lieu de campement.

Un mélange de rochers, de buissons bas, de fleurs de rocaille à ras de sol et de touffes d’herbes de plus en plus rares succéda aux plantureux alpages ; l’air fraîchissait avec l’altitude et l’approche du soir, quelques choucas tournaient dans le ciel. Après le passage du col du Charnier, la longue grimpe un peu monotone dans les alpages à moutons aboutit

au vallon froid, une étroite cuvette d'herbe perchée au pied d'immenses pierriers dominés par l'imposante silhouette du Grand Ferrand.

- Ouf ! , laissa tomber Kirgard, pas mécontent d'arriver. Les sacs à dos déballés, les tentes montées en quelques minutes dans la fraîcheur du soir, le repas bienvenu réchauffa les corps, les cœurs et les conversations.

Allongés sur l'herbe dans leurs sacs de couchage, ils regardaient s'établir la nuit dans un silence introuvable ailleurs qu'à 2400 mètres d'altitude ; le ciel de la mi-août les gratifia d'une voûte somptueuse, où les constellations scintillaient sur un fond d'encre bleu-noir. On percevait à l'œil nu la galaxie d'Andromède et la nébuleuse d'Orion.

- Contemplez ce ciel! de la pure beauté, clama Noël, un peu pour agacer Robin.

- Encore ta manie de chercher de la beauté partout, ne manqua pas de répliquer Robin ; pourquoi prétendre qu'un ciel étoilé est beau ? Que tu dises que c'est impressionnant, je veux bien, parce que tu sais un peu mieux que tes ancêtres ce qui se cache derrière ce plafond de petites lumières, tu as appris que lorsque tu regardes Andromède, les photons qui viennent s'écraser sur ta rétine sont partis de là-bas il y a plus de deux millions d'années, mais pourquoi appeler cela de la beauté ?

- Moi, je voyage dans les étoiles, les interrompit joyeusement Grisella allongée dans l'herbe. Quand je regarde fixement le ciel à la verticale, au bout de quelques secondes j'ai l'impression d'avancer vers les étoiles; cela me donne un délicieux vertige.

- Un qui trouve ça beau, une à qui ça donne le vertige, qu'est-ce qu'ils ont ce soir, ces intellos, ironisa Robin. Vous me faites repenser à la petite sœur de Noël qui tient de famille, elle m'a sorti ce matin de mon polar en regardant l'orage pour me poser une colle: « Dis, Robin, c'est grand comment, l'univers? ». Je lui ai bêtement répondu que c'était très grand, encore plus grand que ce qu'elle pouvait imaginer, mais qu'on ne savait pas trop. Je ne pouvais tout de même pas lui parler d'années-lumière.

- Eh bien maintenant qu'on l'a sous les yeux, cet univers, réagit Grisella, on pourrait peut-être reprendre sa question et demander une réponse plus étoffée au professeur Kirgard qui pourrait entretenir sa forme intellectuelle en donnant quelques cours de vacances .

- Oh là ! jeunes gens, on est en vacances, à quoi jouez-vous ?

- On pourrait jouer à un jeu de rôles, pour ne pas changer ce serait vous le professeur et nous les élèves, mais pendant les vacances, c'est plutôt un jeu, car on sait que les enseignants adorent les petites classes peu nombreuses, on peut y poser les questions que l'on veut. Please, professeur, jouez votre rôle avant que nous refermions nos tentes pour dormir !

- La petite sœur de Noël se pose des questions auxquelles on peut difficilement donner des réponses compréhensibles à son âge, dit Kirgard, c'est déjà si difficile au mien ! Robin, tu aurais toutefois pu améliorer ta réponse en ajoutant que l'univers est très vieux, et qu'il est justement très grand parce qu'il est très vieux car il s'agrandit chaque jour un peu plus avec le temps qui passe.

- Ouais ! je ne suis pas certain que c'eût été plus clair ! On a tous entendu parler de l'âge de l'univers et de son expansion, mais plutôt dans les revues que dans les cours de nos filières respectives; comment peut-on avancer cet âge de 10 à 15 milliards d'années depuis un prétendu début ?

- Alors allons-y pour un résumé flash, admit Kirgard :

Les connaissances actuelles permettent effectivement de situer son âge autour de 13,7 milliards d'années depuis ce fameux Big-Bang, que l'on peut à la rigueur nommer création parce qu'on ignore totalement ce qui pouvait exister auparavant, et à partir duquel il grandit de plus en plus vite ; il semble toutefois fini, et non pas infini, sa taille semble être actuellement de l'ordre de 10^{23} km, soit une dizaine de milliards d'années lumière, c'est-à-dire presque un million de milliards de fois la distance de la terre au soleil. Voilà pour la réponse à la petite sœur de Noël.

Pour vous, j'ajouterai que l'univers est très ténu puisqu'un volume d'espace de la taille de notre planète ne contient en moyenne qu'un microgramme de matière, soit une densité moyenne d'environ un atome pour 10 mètres cube, et il devient de plus en plus ténu au fur et à mesure de son expansion, mais je ne doute pas que vous ayez remarqué que ces atomes, qui seraient au nombre approximatif de 10^{78} à 10^{80} , ce qui ne dit rien à personne, ont une tendance à se grouper en étoiles et planètes séparées par de grands espaces vides, formant tout de même la masse fort respectable de $5,7 \cdot 10^{50}$ tonnes, ce qui ne dit rien à personne non plus, mais représente en gros 10^{29} fois la masse de notre terre, c'est à dire 100 milliards de milliards de milliards de fois notre planète.

Cette masse de l'univers perceptible est distribuée entre environ 10^{23} étoiles réparties dans une centaine de milliards de galaxies et d'amas de galaxies, et cet univers est en expansion à une vitesse de l'ordre des 2/3 de la vitesse de la lumière, il ne cesse de grandir en croissant toutes les 5 secondes d'un volume égal à celui de notre propre galaxie, cette magnifique voie lactée qui nous enveloppe ce soir d'un bord à l'autre de l'horizon avec son anneau d'étoiles d'environ 100.000 années lumière de diamètre, dont notre soleil, et nous avec, faisons le tour à la vitesse de 230 kilomètres par seconde en 200 millions d'années, pendant que cette même galaxie et sa sœur Andromède que vous contempriez tout à l'heure se rapprochent dangereusement l'une de l'autre, et se précipitent ensemble à 500 kilomètres par seconde vers l'amas d'étoiles de la vierge qui est leur plus proche voisin à 60 millions d'années lumière.

Si on imagine notre univers aux dimensions d'un nuage de poussières de 1 mètre de diamètre, notre pauvre galaxie lactée n'y serait qu'un grain parmi 100 milliards de grains de poussières et notre système solaire fait partie des 100 à 200 milliards d'étoiles contenus dans ce grain de poussière. Tu vois, Robin, que ta réponse était finalement meilleure que la mienne pour la petite sœur de Noël qui fait déjà un complexe d'être la petite.

- Bang ! , ça c'est un résumé vraiment flash, en une minute, j'ai retrouvé mon vertige, dit Grisella.

- Ce qu'il est important de percevoir est que ces quantités énormes sont tout de même finies, reprit Kirgard, et que si l'on en croit Olbers, cet univers n'est ni infini ni éternel parce que la nuit est noire.

- Tout à l'heure, l'univers était très grand parce qu'il était très vieux, maintenant il est fini et mortel parce que la nuit est noire! Ne jouez-vous pas à être aussi obscur que la nuit, professeur? ironisa Robin.

- Certes, cela ressemble un peu au «et c'est pour cela que votre fille est muette» du médecin malgré lui de Molière, mais ce n'est pas un canular, c'est le paradoxe d'Olbers, qui dit que si l'univers était éternel et infini, et sachant que les étoiles ont une taille finie, nous verrions des étoiles dans toutes les directions de l'espace ; chaque direction du ciel serait occupée par au moins une étoile et l'ensemble du ciel serait aussi brillant que la surface du soleil. Même de jour, nous ne pourrions distinguer le soleil de ce fond lumineux. Or on constate que la nuit, le ciel est noir et les étoiles ne sont pas jointives ; donc l'univers ne peut être infini et éternel. On pourrait certes discuter un peu le simplisme de cette démonstration car il traîne dans l'espace interstellaire des poussières qui, bien que très dispersées, finissent par former un rideau ténu qui affaiblit les lumières les plus lointaines qui tombent du ciel, mais admettons en gros ce que dit Olbers.

Pour justifier cet aspect évident du ciel, on pourrait concevoir que l'univers soit statique et fini, auquel cas il n'existerait aucune étoile au-delà de ses limites, et certaines lignes de visée ne rencontreraient donc aucune étoile, ce qui expliquerait le fond noir de la nuit. Il

pourrait aussi être infini, mais d'âge fini, la lumière des étoiles les plus lointaines ne nous étant pas encore parvenue.

La réponse actuelle à cette question est que l'univers est fini en dimensions et en âge, non statique mais en expansion continue comme le laissait d'ailleurs prévoir les équations de la Relativité Générale d'Einstein et comme l'a vérifié Hubble ; plus les étoiles ou galaxies sont lointaines, plus leur vitesse d'expansion est élevée. Nous devons toutefois rester prudents sur le caractère permanent de cette expansion en attendant une meilleure connaissance du rapport entre la densité réelle de l'univers et sa densité critique, mais cela nous entraînerait trop loin ce soir.

- C'est quoi, cette histoire de densités, dit Noël, on va mal dormir cette nuit si vous ne nous en dites pas plus ce soir, on vous donne encore un quart d'heure.

- Bon, je vous ai parlé d'univers observable, c'est celui que l'œil peut voir à travers les télescopes optiques, qui ne voient que les corps célestes émettant de la lumière, ou à travers des radiotélescopes ou les télescopes à rayons X ou gamma, sur d'autres longueurs d'ondes non perceptibles par l'œil ; cet univers observable présente une densité moyenne de 1/10 de nucléon (ou d'atome d'hydrogène pour simplifier si vous préférez) par mètre cube, or on calcule que si la densité cosmique est inférieure à 10 nucléons par mètre cube, l'expansion et le refroidissement corrélatif se poursuivront indéfiniment, alors que si cette densité est supérieure à 10, l'attraction mutuelle ralentira l'expansion, puis l'inversera en contraction réchauffante qui peut retourner à un Big Crush symétrique du Big-Bang en un cycle cosmique. La densité critique calculée de 10 nucléons par mètre cube sépare les deux pronostics sur notre avenir, alors que la partie visible de l'univers semble indiquer une densité de 1/10 de nucléon, soit seulement 1/100 de la valeur critique.

- Alors on va donc vers une expansion et un refroidissement sans fin ?

- La température tombe de moitié quand l'expansion double les distances. Aux premiers instants d'un univers très petit, le refroidissement était très rapide, mais maintenant qu'il est très grand et déjà très froid, il faudra attendre pas mal de milliards d'années pour que les distances intergalactiques doublent et fassent tomber la température du fond du ciel, qui n'est déjà plus que de 2,7K, à 1,35K, donc pas de panique, mais ce qui est certain, c'est que l'expansion a déjà considérablement modifié l'aspect du ciel. Si vous vous étiez trouvés ici au début de la formation de notre chère planète il y a un peu plus de quatre milliards d'années, et que vous ayez eu la curiosité de regarder le ciel comme nous le faisons ce soir, vous l'auriez trouvé beaucoup moins noir qu'aujourd'hui, avec des étoiles plus serrées, plus bleues et de très nombreuses galaxies visibles à l'œil nu, qui exigent maintenant des télescopes géants pour être aperçues.

Notez en passant les écarts énormes de température régnant dans l'univers entre le centre des étoiles à plusieurs millions de degrés et le fond du ciel à environ trois degrés Kelvin.

Mais quant à savoir si cette expansion va durer éternellement, ce n'est pas si certain, car on a observé que les vitesses de rotation des galaxies sur elles-mêmes sont plus élevées que ce que le calcul prévoit à partir des seules masses observables, ce qui laisse supposer qu'il existe des forces de gravitation internes beaucoup plus importantes que celles créées par la matière observable ; ces forces pourraient être créées par les fameux trous noirs, qui semblent exister au cœur des galaxies, et cette masse invisible, mais détectable par ses effets gravitationnels, augmenterait la densité moyenne au 1/10 de cette valeur critique ; mais il faut, pour aller au delà, faire l'hypothèse d'une énorme quantité de matière "sombre" cachée, uniformément répartie dans l'univers, non observable actuellement, très supérieure à la quantité de matière détectable soit par son rayonnement, soit par ses effets gravitationnels, ce qui modifierait considérablement la densité moyenne de l'univers et

pourrait la situer au voisinage de la densité critique, annonçant un avenir à peu près "plat", en équilibre entre l'expansion et la contraction.

On ne sait pas de quoi est faite cette matière "sombre" mystérieuse qui constituerait l'essentiel de notre univers : Des nuées de petites étoiles ratées peu lumineuses non perceptibles, des quantités de petits trous noirs non détectables, des nuages d'hydrogène froid invisibles où les galaxies puiseraient pour former de nouvelles étoiles, ou bien de monstrueuses quantités de neutrinos ? Encore faudrait-il que ces neutrinos aient une masse, ce qui reste aujourd'hui incertain pour le neutrino le plus courant, mais peut-être une des trois catégories de neutrinos pourrait faire l'affaire, le neutrino "tau" qui est le plus massif ; est-ce une matière "exotique" faite de particules autres que les protons, neutrons, électrons et neutrinos qui constituent notre matière habituelle ? un reste de particules extrêmement massives du début du monde, des particules dites "supersymétriques" n'interagissant pas avec la matière actuelle, donc invisible ? Tous ces candidats à la matière sombre sont regroupés par les astrophysiciens sous le vocable de "macho" (massive compact halo objects), objets compacts et massifs du halo galactique. Les cinquante prochaines années nous le diront peut-être, mais on doit reconnaître qu'il est bien agaçant d'ignorer de quoi est fait plus de 90 % de notre univers.

D'autres hypothèses traînent dans les esprits, l'énergie du vide, dont il serait trop long de parler ici, pourrait contribuer à combler cette masse manquante. Une autre hypothèse, en concurrence avec celle de la matière "sombre", est celle de la matière "ombre", imaginée par Green, Schwartz et Abdus Salam et défendue en France par J.P.Petit³. Selon cette hypothèse audacieuse, l'univers perceptible aurait un frère, l'univers "ombre", occupant le même espace, dont la matière n'interagirait avec la matière de notre univers que par la seule force de gravitation, mais répulsive, maintenant les galaxies dans une sorte de corset les empêchant d'exploser sous l'action de leur force centrifuge, sans avoir besoin de faire appel à une attraction centrale due à cette hypothétique matière "sombre". Cette matière "ombre" ne nous serait pas perceptible puisqu'elle n'interagit avec la matière de notre monde que par l'unique force de gravitation. Les photons, qui sont l'expression de la force électromagnétique et l'agent transmetteur d'informations, ne peuvent relier ces deux mondes qui restent donc invisibles l'un pour l'autre.

- Oh là là, ça se complique, s'exclama Grisella. On était quand même plus serein avant Galilée avec notre bonne terre reposant au centre d'un univers statique et éternel ! Si Hubble n'avait pas prouvé l'expansion, aurait-on eu l'idée de remonter la mécanique à l'envers et d'inventer cet effroyable Big-Bang ?

Mais puisque vous résumez si vite que vous n'avez pas utilisé le quart d'heure que vous a octroyé Noël, expliquez-nous donc comment tout cela a commencé au temps zéro.

- Désolé, Grisella, mais ça, Dieu seul le sait, si c'est Lui le coupable ; à part Lui, personne ne sait ce qui s'est passé au temps zéro, sinon qu'on le situe du côté de 13,7 milliards d'années aux dernières nouvelles. Par contre à partir de cette vaste imprécision le mystère cesse et une ultraprécision commence : On ne sait pas encore ce qui s'est passé entre le temps zéro et 10^{-43} seconde, mais on reconstitue avec beaucoup d'indices très sérieux comment le scénario s'est déroulé à partir de ces 10^{-43} seconde, si vous pouvez essayer d'imaginer ce que peut être un âge aussi jeune, et on peut commencer à parler d'espace et de temps, ce qu'on est incapable de faire à ce fantastique temps zéro, où l'espace et le temps semblent avoir été créés ensemble.

Alors en route pour ce superfilm de science-fiction qui mériterait un Oscar au festival de SF d'Avoriaz si on avait le droit de l'y présenter, mais on ne peut pas car ce n'est pas un film de science-fiction, mais plutôt un documentaire historique qui présente une probabilité de vérité du même ordre que la plupart des films historiques qui passent sur nos écrans.

Donc à 10^{-43} seconde l'univers occupe déjà de l'espace, mais si peu : 10^{-24} micron, et sa température est de l'ordre de 10^{32} degrés. La superhypergigantesque énergie injectée dans cette création se transforme en quelque chose qu'on appelle la matière ou la masse, selon la loi d'Einstein $E = mc^2$. Le temps vient d'être inventé en même temps que l'espace, et la température inouïe de cet univers initial baisse à toute allure avec le temps t qui passe, en $1/\sqrt{t}$, pendant que son volume augmente follement en t^2 . Cela ressemble un peu à la détente adiabatique des gaz que vous avez tous apprise à l'école, mais avec un caractère vraiment explosif.

Les plupart des lois actuelles de la physique n'étaient pas encore applicables à ces températures diaboliques parce que les formes structurées sous lesquelles on perçoit actuellement la matière, ses atomes et leurs interactions n'existaient pas encore ; l'existant était une espèce de soupe de cette espèce de "matière" récemment créée et faite de quarks, qui sont les constituants de base de la matière actuelle, et d'antiquarks, qui sont symétriquement les constituants de l'antimatière que l'on sait maintenant fabriquer dans les grands laboratoires comme ceux du CERN à Genève en injectant de l'énergie dans le vide, car toujours selon $E = mc^2$, toute injection d'énergie E crée de la masse m , sous la forme de matière et d'antimatière en quantités égales afin de respecter la conservation de ce qu'on appelle les charges, électriques ou autres. On trouve aussi dans cette soupe des électrons, et donc des antiélectrons, des neutrinos, des antineutrinos et des photons, qui sont leur propre antiparticule, comme nous le verrons plus tard si vous le souhaitez. Les particules et antiparticules se réassocient en s'annihilant, restituant leur l'énergie qui recrée d'autres particules et antiparticules dans une ronde éfrénée.

³ Jean-Pierre Petit *On a perdu la moitié de l'univers* Hachette Pluriel 2001

Cette soupe originelle brûlante était régie par ce qu'on pense avoir été une loi unique, dite "superforce", qui a sévi pendant cette "ère de grande unification", jusque vers 10^{-38} seconde, puis, au cours de l'expansion et du refroidissement qui l'accompagne, cette superforce cèdera la place aux forces qui constituent notre physique actuelle et apparaissent progressivement dès que la baisse de température le permet: La force de gravité sort de l'ombre vers 10^{-33} seconde, puis vers 10^{-32} seconde la force "forte", cette espèce de colle qui assure la cohésion des noyaux atomiques, et à peu près en même temps une force "électrofaible" provisoire, ces deux dernières forces étant moins palpables dans la vie quotidienne que la gravité, mais je ne vais pas vous faire maintenant un cours sur elles. Vers 10^{-12} seconde, la température aura chuté en dessous de 10^{15} degrés, et cette dernière force électrofaible se différenciera elle-même en force "faible" également mal connue de vous, et en force électromagnétique par contre très populaire puisqu'on la retrouve à la base de toutes les commodités de notre vie moderne et grâce à laquelle ton petit frère peut jouer sur son ordinateur.

Le volume de cet univers nouveau-né double tous les 10^{-34} seconde, c'est la phase dite inflationnaire, où l'univers grandit soudainement de plusieurs milliards de fois, à une vitesse d'expansion qui dépasse la vitesse de la lumière, ce qui n'est pas concevable avec les lois actuelle de la physique ; on pense que lorsque l'univers mesurait environ un centimètre, la lumière n'avait pu parcourir depuis le temps zéro qu'environ 10^{-30} centimètres, il a donc pu se former pendant cette courte période d'inflation supraluminale de multiples sous-univers ne pouvant plus jamais communiquer entre eux par la suite, dont le nôtre ne serait que l'un d'eux.

Notre univers occupe bientôt une sphère de l'ordre de quelques millions de kilomètres ; Au cours du refroidissement très rapide qui accompagne cette inflation brutale, la soupe épaisse des quarks et antiquarks qui constituait essentiellement l'univers s'est épicée de particules plus légères appelées leptons, qui sont les électrons bien connus et les neutrinos et muons qui le sont moins, ainsi que leurs antiparticules correspondantes.

Entre un millionième et un dix millième de seconde la température baisse de 10^{13} à 10^{12} degrés et ne peut plus interdire l'action de la force "forte" qui agglutine alors trois par trois les quarks d'une part, et les antiquarks d'autre part pour former des particules plus lourdes que l'on appelle des hadrons, incluant nos protons et neutrons actuels, ainsi que leurs frères ennemis les antiprotons et les antineutrons, mais très vite la température devient trop basse pour continuer à créer de telles particules lourdes, alors qu'elles s'annihilent lors de leurs rencontres entre hadrons et antihadrons. La guerre commence, chaque rencontre entre deux frères ennemis entraînant leur annihilation mutuelle et l'émission de photons de lumière.

L'issue de la guerre n'a dépendu que de l'arithmétique, car pour une raison que Dieu seul connaît, pour chaque milliard d'antiquarks, il y avait en face un milliard plus quelques quarks, donc après une destruction phénoménale de candidats à la matière, il n'en subsista que quelques très rares sur un milliard pour constituer les noyaux des atomes de notre matière ; quel gâchis, me direz vous, ce gigantesque feu d'artifice de matière et d'antimatière parties en lumière, mais quelle sécurité pour le futur puisqu'il n'y a pratiquement plus d'antimatière destructrice dans notre univers purgé. Il faudra attendre quinze milliards d'années pour qu'une espèce de macromolécule améliorée nommée homme en recrée quelques petites doses bien contrôlées dans les grands accélérateurs de particules de Genève et d'ailleurs.

La température, qui n'est rien d'autre que l'énergie cinétique moyenne des particules, continue à décroître en raison inverse de la racine carrée du temps écoulé depuis le Big-Bang ; de 10^{12} à 10^{10} degrés elle ne dispense plus assez d'énergie pour créer encore des particules lourdes constituant les noyaux, mais reste assez haute pour continuer à créer des particules légères comme les leptons jusqu'à environ 1 seconde où un massacre similaire entre leptons et antileptons de 1 à 13 secondes va encore émettre beaucoup d'énergie lumineuse et ne laisser subsister qu'un faible nombre d'entre eux vers 3 milliards de degrés, qui vont commencer à flirter avec les protons et neutrons nés juste avant eux pour constituer progressivement les futurs atomes ; ce seront d'abord les protons et neutrons qui pourront s'accoupler de manière stable dès que la température sera descendue à un million de degrés vers 3 minutes d'âge de l'univers pour former plus tard les premiers noyaux légers comme ceux de l'hydrogène et de l'hélium qui ne nécessitent que 1 à 4 protons et neutrons.

Cette formation des noyaux atomiques les plus légers ne dure que de 3 à 30 minutes d'âge car ensuite la température est trop basse pour permettre la fusion nucléaire ; tout le stock des composants de la matière de l'univers est alors constitué et sa masse est définie. Avec toute cette énergie lumineuse libérée, l'univers rayonne : « Que la lumière soit », et la lumière continue d'ailleurs à se créer par les combats d'arrière garde entre les derniers leptons et antileptons, mais la température baissant, les photons ont de moins en moins d'énergie et ne peuvent plus traverser le plasma de protons et d'électrons qui les absorbe, le monde devient alors opaque.

On change d'échelle, au bout d'un temps de l'ordre de 500.000 à un million d'années, la température est tombée vers 3000 degrés et les photons du rayonnement n'ont plus assez d'énergie pour empêcher le mariage des leptons et des hadrons après un très long flirt : c'est la naissance des atomes les plus simples d'hydrogène et d'hélium, électriquement neutres puisqu'ils associent 1 proton positif à 1 électron négatif pour l'hydrogène, ou 2 protons à 2 électrons pour l'hélium. Notez que ces deux corps élémentaires constituent encore aujourd'hui environ 98 % de la matière de l'univers.

Ces atomes stables nouvellement nés ont un comportement totalement différent de celui de leurs composants vis à vis de la lumière : alors que les protons et électrons dans leur état libre que permettait une température plus élevée, étaient de grands absorbeurs de photons et avaient rendu l'univers opaque, leur mariage sous forme d'atomes leur a fait perdre cette agressivité et l'univers redevient transparent. A nouveau « fiat lux ».

Ce gigantesque rayonnement de lumière à 3000 degrés s'est propagé dans tout l'univers au fur et à mesure de son expansion et de son refroidissement en allongeant sa longueur d'onde ; ce rayonnement fossile subsiste de nos jours et a pu être identifié en 1965 par Penzias et Wilson qui en ont été récompensés en 1978 par le prix Nobel. Sa température actuelle n'est plus que de 2,7 degrés K. Sur 1000 photons qui parcourent le ciel aujourd'hui, 999 voyagent depuis cette explosion de lumière, soit plus de 400 photons par centimètre cube d'espace, mais ils sont très affaiblis, leur énergie individuelle n'étant plus que de un millième de celle des photons solaires.

Cette explosion de lumière marqua la fin de l'ère radiative de l'univers à un peu moins d'un million d'années. L'énergie lumineuse qui dominait le cosmos va céder progressivement la place à l'énergie concentrée sous forme de matière, car l'expansion n'affecte pas le contenu énergétique mc^2 de la matière, alors qu'elle affaiblit celui des photons dont la longueur d'onde s'allonge avec l'expansion. Aujourd'hui encore, le nombre de photons de lumière est trois milliards de fois supérieur au nombre de nucléons de matière, mais leur énergie est très faible, et il y a dix mille fois plus d'énergie dans la matière de l'univers que dans tout le rayonnement fossile. On peut dire que la matière domine maintenant le monde.

Un milliard d'années passent, la force électromagnétique ne se fait plus guère sentir car les atomes nouvellement formés sont électriquement neutres, les forces forte et faible passent également inaperçues parce que leur portée est bien trop courte et ne concerne que le noyau des atomes ; la force qui prend le pas sur toutes les autres pour sculpter l'univers est maintenant la gravitation : la matière attire la matière.

La température moyenne de l'univers tombe vers 100K, de légères disparités de densité apparaissent, comme des grumeaux dans la purée, amplifiant ici ou là les forces de gravitation et concentrant peu à peu davantage de matière dans ces zones, formant des milliards de superamas représentant chacun une masse de 10 millions de milliards de fois celle de notre soleil, d'où émergeront peu à peu par agglutination gravitationnelle les galaxies et les étoiles.

Cette compression gravitationnelle va porter le cœur des étoiles nouvellement formées à des températures supérieures à 10 millions de degrés, permettant la fusion nucléaire de l'hydrogène en hélium, et amorçant ainsi une réaction nucléaire entretenue qui fait que les étoiles brillent, mais pas éternellement puisque qu'elle consomme de l'hydrogène comme combustible. Pour les plus grosses d'entre elles, la température est encore plus élevée, autorisant d'autres types de réactions nucléaires plus violentes, et ces étoiles vont en quelques millions d'années consommer leurs noyaux d'hydrogène, puis amorcer un effondrement gravitationnel qui va faire monter la température vers 200 millions de degrés, permettant la fusion des noyaux d'hélium en noyaux de carbone .

A ce stade, ces étoiles gonflent en géantes rouges, puis quand tout l'hélium est consommé, elles se contractent en s'échauffant vers 500 millions de degrés, ce qui permet la formation des atomes plus lourds : néon, oxygène, sodium... jusqu'au fer, et ces grosses étoiles effondrées explosent alors en supernovae aussi brillantes que 100 millions de soleils pendant plusieurs semaines, dispersant dans l'espace interstellaire les noyaux d'éléments lourds qu'elles avaient cuits dans leur sein, dont certains forment les rayons cosmiques qui traversent notre haute atmosphère, mais dont la plupart vont s'associer à des électrons pour former des atomes errant au sein de nuages de poussière.

Ces poussières se rassemblent par gravitation et se réchauffent à nouveau par compression gravitationnelle, reformant d'autres étoiles plus jeunes, entourées elles-mêmes d'anneaux de poussière qui s'agglutinent en formant des planètes. C'est ainsi qu'est né notre soleil il y a 4 à 5 milliards d'années et qu'il s'est entouré de ses neuf planètes où sont rassemblés les éléments plus lourds et plus riches dont les multiples combinaisons ont conduit sur notre Terre à des molécules de plus en plus complexes jusqu'à ce qu'un jour certaines parviennent à se diviser en se reproduisant à l'identique, et la vie est apparue, d'abord sous forme d'organismes unicellulaires pendant quelques milliards d'années, se complexifiant ensuite en organismes pluricellulaires, en végétaux et animaux pour conduire jusqu'à nous qui contemplons ce soir cet univers qui a un peu grandi depuis son enfance.

Mais je crois que vous m'avez fait dépasser mon temps de parole et il est peut-être raisonnable de rentrer maintenant sous nos tentes.

- Ce scénario époustoufflant me laisse plein d'admiration pour les scientifiques-policiers qui ont mené cette enquête énorme et sont parvenus à remonter la filière de l'évolution, dit Noël, mais je note qu'on ne pourra probablement jamais remonter au vrai temps zéro. Kirgard a dit que Dieu seul sait ce qui s'est passé, "*si c'est lui le coupable*", a-t-il ajouté, ce qui donne à la création de l'univers un air de grand polar dont l'enquête continue car on ne connaît pas vraiment la clé de l'énigme.

Pourquoi d'ailleurs serait-ce un polar, moi je le vois plutôt comme un immense poème épique, car je ne comprends jamais rien aux polars et préfère les poèmes, et j'ai plutôt envie de chercher l'auteur génial du poème que ce dit coupable.

Mais cette admirable conjugaison d'observations astronomiques et de physique des hautes énergies me laisse quand même des doutes sur les chances d'exactitude de ce scénario, pour la toute simple raison que toutes les cosmologies précédentes ont toujours été démolies par les suivantes. Il y a seulement 200 ans, les savants pensaient que le monde avait 6000 ans, il y a 100 ans, ils pensaient qu'il avait quelques millions d'années, aujourd'hui, on pense qu'il en a 13 à 15 milliards ; le monde est ce qu'on pense qu'il est à une époque donnée. Peut-on exclure que cet univers déjà si impressionnant soit encore beaucoup plus grand que ce que l'on en perçoit ? Comme vous l'avez évoqué, il est peut-être fait de bulles séparées ne communiquant plus entre elles, issues de cette période d'inflation à une vitesse supraluminale qui nous interdit à tout jamais de "voir" l'état de l'univers avant cette inflation puisque toute communication avec les autres bulles nous est impossible; notre perception ne dépassant pas notre propre bulle. L'univers que vous nous avez décrit n'est peut-être qu'une infime fraction d'un univers total que l'on est incapable d'imaginer, et je préfère laisser à mon petit frère qui est féru de science-fiction le soin de bâtir d'autres hypothèses.

Cette description trop précise de ce fantastique scénario me laisse de toute manière dans un sentiment de transcendantale incompréhension sur la cause première, et même sur certaines étapes comme ce déséquilibre de un milliardième entre les populations de matière et d'antimatière. C'est une description chronologique, pas une clarification du processus fondateur.

Toutefois, si le Big-Bang devient une certitude scientifique, notre monde a connu un début, une sorte de coup de baguette magique, et cela me semble plutôt consolider l'idée d'un Dieu créateur, bien entendu sans pouvoir préciser autrement ce terme de Dieu. Face à notre ciel si pur de ce soir, je me sens davantage envahi par une sorte d'extase que par le désir de comprendre s'il y a un coupable ou un auteur de poème et Qui est-il, car j'ai au fond de moi une conviction innée qu'on ne viendra jamais au bout de cette enquête, que l'univers restera mystérieux comme un grand polar dont on ne trouvera jamais l'énigme, et je me sens plutôt porté vers la contemplation et la prière. C'est probablement inavouable après une telle présentation, non ?

- Les cosmologies précédentes étaient toutes mythiques et sans fondement scientifique, corrigea discrètement le professeur ; celle ci sera sans doute amendée en quelques points, et on ne peut même pas exclure que la récente théorie des supercordes permette peut-être de parler scientifiquement d'un avant Big-Bang, mais l'histoire de l'univers à partir de ce que nous appelons aujourd'hui le Big-Bang paraît de plus en plus solide dans ses grandes lignes. Quant à la cause première qui te fait souci, je t'accorde que les équipes d'enquêteurs qui se sont succédées sur le dossier sont toujours partagées entre l'hypothèse d'un acte délibéré et celle d'un accident.

- Allez les enfants, au dodo, j'ai froid, lança Grisella ; puisque tu as plutôt envie de prier pour être à l'unisson du poème de l'univers, Noël, dis-nous une prière du soir avant de rentrer sous nos tentes... ou alors toi, Robin, cela te ferait peut-être du bien une petite prière de temps en temps.

- Ne les mets pas en compétition, Grisella, tempéra le professeur... ou alors essaie donc toi-même de nous proposer une prière contemplation du ciel qui puisse clore cette discussion.

- Pitié, professeur, je reconnais ma légèreté d'avoir proposé une prière publique car la prière est affaire strictement privée ; le discours public est fait de mots dont la signification doit être claire pour tous et ne doit donc traiter que de sujets qui le permettent ; la prière est une tentative de communication entre un individu et Dieu lorsqu'il croit qu'il existe et qu'il peut s'adresser à Lui, elle comporte bien sûr des mots puisque c'est l'habituel canal de la pensée, mais quand l'individu s'abîme dans une espèce de contemplation-prière-communion, le support des mots ne devient plus vraiment indispensable et la bulle de sa pensée les dépasse.

J'ai toujours éprouvé un sentiment de gêne en entendant des prières publiques, qu'elles soient catholiques, protestantes, israélites ou autres, car les mots utilisés sont naturellement les mots simples de la communication courante et j'ai une tendance maligne à buter sur chacun d'eux et à m'en faire un commentaire interne plutôt décapant en dédoublant ma pensée au lieu de la laisser voler. Après cette demi-heure d'exposé si précis, il serait cruel de me demander d'utiliser des mots dont le sens est flou ; quand on prie, on n'analyse pas, il faut être porté par une foi, ce qui n'est pas la chance de tous.

- Alors, fais nous au moins partager ta gêne et tes commentaires décapants dans une prière publique commentée, ironisa Robin, ce sera peut-être amusant de voir si ta pensée vole ou est piégée par l'analyse.

- Ta prière ! ta prière ! ta prière ! Grisella, scandèrent en chorus les autres.

- Vous êtes impitoyables, alors si vous considérez cela comme une pénalité pour mon inconscience avant d'aller dormir, je veux bien expier ma faute d'avoir lancé cette idée saugrenue. Je suppose que compte tenu de notre commune culture chrétienne, le «Notre Père» peut satisfaire tout le monde ?

- OK ! vas y.

- «Notre Père qui êtes aux cieux»,... *tout de suite deux idées majeures : nous avons un père qui nous a donc créés avec tout cet énorme bazar que nous avons au-dessus de nos têtes, mais ce père que personne n'a encore pu identifier, on le situe là-haut, dans les "cieux", hors de toute possibilité de vérification ; ce serait peut-être mieux de dire «qui êtes ailleurs»*

- Pas sûr, commenta Noël, on pourrait aussi bien dire «qui êtes en nous» ou «qui êtes partout», bande de policiers amateurs, cessez donc de vouloir l'identifier et le localiser. Flaubert a dit: Dieu est présent partout dans sa création, mais visible nulle part.

- Stop, ou je me couche tout de suite, trancha Robin. Laisse continuer Grisella et qu'on dorme.

- «Que votre nom soit sanctifié»... *Pas grand chose à en dire : le nom, on l'invente, en français on dit DIEU, mais c'est un code qui est incapable de décrire le sujet. Jean Rostand a assez bien cerné le problème en écrivant : « Dès qu'il parle de Dieu, l'homme outrepassé ses droits langagiers ».*

Qu'il soit sanctifié, cela revient à peu près à : c'est impressionnant, c'est grandiose, que votre nom soit associé à l'émerveillement, c'est intouchable par l'esprit, c'est saint ? Je me sens incapable d'analyser plus.

«Que votre règne arrive»... aïe aïe aïe, il n'est donc pas encore arrivé, ce règne ? Avec tout cet univers qui a été créé par Lui et Lui seul, Dieu unique ? Qu'est ce que cela veut dire ? qu'il n'a pas fini son travail ? Des étoiles naissent, d'autres meurent, notre soleil et notre terre ne sont nés que dix milliards d'années après la création du grand tout, et n'en ont plus que pour cinq milliards d'années et nous, les hommes, n'apparaissions que bien à l'intérieur du dernier treizième milliard d'années ! Le sixième jour a été bien long à venir ! Et nous serions alors, pensent certains, le point culminant, au moins provisoirement, de cette création qui attend encore Son règne ! Bizarre, cet appel à la création continue !

«Que votre volonté soit faite sur la terre comme au ciel», qu'est-ce qui L'en empêche, n'est-il pas seul à Vouloir ? Y a-t-il un adversaire qui Le contrecarre, ou est-ce la liberté de l'homme qui fait craindre à l'homme qui prie des difficultés pour que Dieu arrive à ses fins ?

«Donnez-nous aujourd'hui notre pain de chaque jour»... C'est déjà plus simple, on quémande auprès du maître ; finies les préoccupations cosmiques, il faut nous aider à vivre notre vie quotidienne, mais personnellement, je préfère «aide-toi, le ciel t'aidera».

«Pardonnez-nous nos offenses comme nous pardonnons à ceux qui nous ont offensés»... On a décidément changé de registre, mais c'est la phrase que je préfère, celle que je comprends pleinement, que je sens, car elle introduit la notion nouvelle d'amour, on est au niveau plus quotidien du comportement humain.

«Ne nous laissez pas succomber à la tentation, mais délivrez-nous du mal » Il est certes plus esthétique de ne pas avoir à se faire pardonner trop de choses, et pour réussir cet honorable comportement, il faut qu'IL nous aide là encore car nous sommes faibles, faibles et très humbles sur notre potentiel de vertu.

"Car c'est à toi qu'appartiennent le règne, la puissance et la gloire, dans les siècles des siècles, amen" *Là, on reste tétanisé devant la grandeur.*

- Oui, c'est à peu près le "Allah Akbar" des musulmans qui a l'avantage d'être plus court, gémit Robin, mais contrairement à ta demande de ne pas succomber à la tentation, laisse-moi plutôt succomber maintenant à la tentation du sommeil,

- Tu trouves peut-être les prières catholiques un peu trop discoureuses, réagit Noël, mais on y trouve cette idée d'amour qui n'est pas dans "Allah Akbar" qui n'exprime que la fascination devant la grandeur. A tout prendre, j'ai un petit faible pour le bouddhisme de la compassion qui ne ressasse ni la grandeur ni l'amour dans sa formule répétée "Oum mané patmé oum", mais seulement la beauté : "la beauté est dans le lotus". Pourquoi la beauté ? Englobe-t-elle tout ?

- Je propose qu'on arrête ici nos méditations nocturnes et qu'on laisse Robin succomber à la tentation du sommeil et Noël rêver à la beauté, tranche le grand juge Kirgard, et que nous étendions cette grâce à nous tous ; vous avez contraint Grisella à cet exhibitionnisme de ses pensées intimes et elle nous a honnêtement livré son commentaire que nous n'allons surtout pas surcommenter ; nous allons tous nous réchauffer dans nos tentes. Réveil une heure avant l'aube si vous voulez voir le lever de soleil du sommet du Grand Ferrand.



coule la Seine

Sous le pont Mirabeau

La nuit fut glaciale et silencieuse. Le réveil à la lueur des torches électriques forçait un peu la nature, et les étirements dans un silence entrecoupé de grognements témoignaient d'un sommeil insuffisant. Les premières paroles articulées ne se firent entendre qu'après le café sorti des thermos. Les constellations avaient changé de position, le ciel toujours aussi pur laissait deviner une pâle clarté naissante à l'est.

- Bousculez-vous un peu, il nous reste une bonne heure de marche avant le sommet et le lever du soleil là haut ; On laisse les sacs pour monter légers, nous démonterons les tentes en repassant ici à la descente, déclara Robin qui minutait toujours les randonnées.

La marche dans l'obscurité fut silencieuse, on n'entendait que les craquements des chaussures sur le chemin à peine marqué et le roulement des cailloux à la traversée des grands pierriers ; la nuit était par instants interrompue par le bref éclat d'une lampe de l'un d'eux qui éclairait ses pas pour s'assurer qu'il suivait bien la trace.

Après une petite heure de marche, l'aube gagna franchement sur la nuit et les lampes devinrent inutiles ; ils abordèrent les cheminées dans une clarté suffisante et continuèrent en silence la voie de contournement de la falaise du sommet, longeant les précipices d'éboulis de la face nord-est.

- Vous êtes tous assez réveillés pour le passage délicat ? alerta Robin, regardez où vous posez les pieds ; le chemin était réduit à cet endroit à un étroit passage sur des blocs de rochers jointifs formant un pont au-dessus du vide, où entre les jambes on apercevait cent mètres plus bas les dernières langues de neige blotties dans l'angle nord des ravines.

- Grisella, toi qui explores les diverses sortes de vertiges, tu peux tester ici le vrai vertige de montagne puisque tu as ton pied comme repère fixe et le vide en dessous.

- C'est vrai Noël, mais comme j'y suis déjà passé plusieurs fois, mon vertige a disparu avec l'accoutumance.
- Je vois que tu es plus sensible aux vertiges intellectuels si j'en juge par tes commentaires d'hier soir. On va essayer de t'en trouver pendant les pauses.
- Ouais ! grogna Robin, mais pour l'instant, il nous faut escalader les dernières grandes roches, le soleil va bientôt pointer le nez.

Un quart d'heure plus tard, ils étaient sur la crête, réchauffés par cette marche matinale ; ils se blottirent dans le cairn creux qui couronnait le sommet afin ne pas perdre trop de calories, et attendirent que le soleil veuille bien se montrer. Ils dénichèrent entre les pierres la boîte en fer contenant le cahier des passages, y notèrent le leur, assorti de quelques plaisanteries de circonstance et de dessins humoristiques. Mais déjà le soleil laissait deviner sa présence au ras des crêtes, puis étalait sa grosse boule rose sur l'horizon dentelé de la Barre des Ecrins ; très vite il émergea et sa teinte vira au blanc éblouissant ; on devinait le Mont Blanc au nord, et au sud la vue portait jusqu'au Ventoux.

- Heureusement que nous n'avons pas grimpé jusqu'ici uniquement pour ce spectacle du lever de rideau, dit Robin, c'est magnifique mais vraiment trop court. Il faudrait pouvoir ralentir le temps !

À nouveau transis par le froid du lever du jour, ils reprirent la marche, descendant avec précaution les grands escaliers de rochers ; au détour d'une grande roche, ils s'arrêtèrent un instant pour apercevoir très loin en bas les tentes de leur camp de base, points minuscules sur le fond encore sombre de ce petit plateau où ils venaient de passer la nuit, à peine discernables dans l'ombre qui noyait encore ce contrefort du Grand Ferrand. Ils dévalèrent les grands pierriers en courant sur les talons à grandes enjambées glissantes, choisissant d'un œil averti les couloirs les plus rapides, à la granulométrie la plus fine ; seules les chaussures n'aimaient pas ce genre de sport, mais eux se régalaient, Kirgard un peu moins, qui les rejoignait en bas de chaque pierrier avec un peu de retard.

Quelques minutes d'arrêt au camp de base leur suffirent pour démonter les tentes dans la fraîcheur du petit matin, avaler quelques gorgées et croquer quelques fruits secs ; Ils préférèrent marcher encore une heure ou deux avant que la chaleur ne s'installe, et faire une pause quand le soleil serait plus haut.

Après une marche un peu somnolente sur des terrains plus faciles pendant que la vie s'éveillait lentement dans la montagne où les choucas recommençaient à tourner dans le ciel et les marmottes à siffler, ils atteignirent une zone escarpée où le chemin leur faisait longer la lame des Clausis, immense lame calcaire aiguë, dressée verticalement, ancien fond marin basculé étalant à sa surface une remarquable collection d'empreintes d'ammonites de belle taille dont les rayons rasants du soleil matinal soulignaient les reliefs.

- Je vous propose de faire la pause ici, lança Noël en prenant une posture napoléonienne pour clamer : randonneurs, 150 millions d'années vous contemplant du haut de ce mur d'ammonites, c'est 50.000 fois l'âge des pyramides d'Egypte, mais pourtant le temps écoulé depuis que ces bestioles ont laissé leur image dans ces sédiments n'est que le dernier centième du temps qui nous sépare du Big-Bang d'hier soir.
- Revoilà le temps, avança Kirgard, trop court tout à l'heure pour admirer le lever de soleil, d'une longueur impensable dans ses traces sur cette lame dressée. Si vous continuez ce jeu de questions, vous n'éviterez pas d'appeler le temps comme témoin à la barre.

- Ouais, coupa Robin sarcastique, on ne va pas se lancer dans la littérature en ressassant Malherbe et sa rose qui se fane trop vite, ou Lamartine et son temps qui suspend son vol au-dessus du lac.

- Pourquoi cette enquête prétentieuse?, intervint Noël, je vous propose plutôt de réfléchir à la beauté de ces ammonites : pourquoi cette croissance en spirale mathématique, et pourquoi trouve-t-on belle cette disposition spiralée et annelée ?

- Ça y est, Noël nous ressort la beauté, pourquoi la beauté ? , il ne sait pas ce que c'est, mais il en parle toujours, recoupa Robin. Personnellement, je suis plus frappé par l'ancienneté de ces ammonites que par leur beauté ; elles ont la forme qu'elles ont, point final.

- Bon, alors parlons quand même du temps, négocia Grisella, à partir de l'évidence que nous rappelle le professeur : l'univers est effectivement tissé de temps, d'espace et de matière qu'il faut bien passer sous la loupe des questions si on veut avancer un peu dans ce jeu-microséminaire d'été.

- Tu as oublié l'esprit, Grisella, à côté du temps, de l'espace et de la matière, l'esprit flotte sur le monde, et il est moins facile à cerner que ses trois autres comparses.

- Ne complique pas les choses, Noël, c'est toi qui vient de lancer le débat sur le temps avec ta déclaration napoléonienne. Je suis bien consciente qu'on n'émettra pas d'idée nouvelle à mettre au dossier sur un sujet philosophique aussi rebattu, on ne pourra guère que se les remémorer en rouvrant les procès-verbaux des enquêtes précédentes, même si elles ont avorté, et il faudra travailler consciencieusement, en n'oubliant pas de citer les enquêteurs précédents comme on les indique en bas des pages dans les livres.

Si j'essaie quand même d'être un peu originale, je dirai qu'en ce qui me concerne, dans ce temps immense avec son immense passé déjà défini et son immense futur encore à définir, qui ne sont tous les deux que des images dans notre esprit, c'est curieusement le présent qui me paraît le concept le plus difficile à cerner, si court, au contraire des deux autres, d'une instantanéité non mesurable! C'est comme un pli mobile sur un inépuisable rouleau de papier du temps, un pli qui séparerait le côté écrit du passé du côté blanc du futur. Le présent est si court qu'il est presque inexistant puisque tout ce qui n'est plus de l'avenir est déjà du passé.

J'ai lu un livre de Jean d'Ormesson⁴ où il a exprimé cela sous une forme littéraire qui me convient assez, en écrivant quelque chose du genre : « *Le présent surfe sur la vague du temps, cette catastrophe qui ne cesse de transformer de l'avenir en passé* ».

- C'est peut-être joli, mais ce n'est que de la littérature, asséna Robin, et on peut penser autrement et aussi bien glorifier le passé de manière moins pompeuse, je me souviens d'avoir lu un amusant poème grammatical dans un bouquin de Pierre Naslin⁵ dont je me rappelle un passage amusant que je vous livre comme contribution :

Le présent et le futur

*Ne sont que des conjugaisons
Dont nous berçons nos illusions
Seul existe le passé
Simple ou composé
Défini ou indéfini
Où s'accumulent les instants*

⁴ Jean d'Ormesson : *Presque rien sur presque tout* - Gallimard 1995

⁵ Pierre Naslin : *La complexité*, p186 - SIRPE 1997

Du futur antérieur.

Au moins c'est un jeu verbal sans prétention philosophique, mais ça ne fait pas non plus avancer le Schmielblick, c'est toujours de la "littérature". C'est bien dommage pour toi, Grisella, si tu as des difficultés à appréhender le présent, car pour moi, c'est le seul temps réel et tangible, le passé et le futur ne sont que des temps reconstitués ou imaginés; le passé n'existe plus et le futur pas encore, seul ce présent sur le fil de rasoir existe. Tu vois qu'on peut gloser sur le temps avec tous les avis possibles, ce n'est toujours que de la littérature.

- Tu devrais être plus indulgent envers les "littérateurs", Robin ; ils ne cherchent pas à définir ce qu'est le temps, mais à en donner des images à travers les sentiments qu'il leur inspire. Les concepts les plus familiers sont quelquefois obscurs, Saint Augustin reconnaissait son impuissance à cet égard lorsqu'il disait du temps «*si on ne me demande pas ce qu'il est, je le sais clairement, mais si on m'interroge, je ne sais plus*»⁶. Quand on n'a guère de moyens pour appréhender un concept un peu fuyant, on doit commencer par en dire des choses simples qui aident à cerner le concept, et en ce domaine la "littérature", comme tu dis, précède nécessairement la science et peut même continuer avantageusement à l'accompagner.

On peut avoir une perception tout autre du présent que le moment instantané, presque inexistant, séparant le passé du futur. André Comte-Sponville y voit au contraire comme toi la seule réalité permanente et contredit saint Augustin qui disait : «*Le présent n'est rien, puisqu'il n'est qu'en cessant d'être*». Ce n'est pas mon expérience, répond Comte-Sponville⁷, «*le présent ne m'a jamais fait défaut, je ne l'ai jamais vu cesser, jamais vu disparaître, mais seulement durer, toujours durer, avec des contenus certes différents, mais sans cesser pour autant de continuer et d'être présent. Cet "instant" conçu comme limite entre le passé et l'avenir n'a qu'une existence abstraite ; l'instant présent bien réel au contraire constitue la continuité du temps. Il n'y a qu'un seul temps, depuis le début, et ce temps c'est le présent. Qui a jamais vécu autre chose ? Pour ma part, je suis sûr de n'avoir jamais habité ni le passé ni l'avenir, mais le **présent** seul, qui dure et qui change. Dans le temps ? Non pas, puisqu'il est le temps même : le présent n'est pas plus dans le temps que l'univers n'est dans l'espace, l'univers "est" l'espace et le présent "est" le temps* ».

Et Guillaume Appolinaire⁸ disait en d'autres termes la même chose que Comte-Sponville :

*Passent les jours et passent les semaines
Ni temps passé*

*Ni les amours ne reviennent
Sous le pont Mirabeau coule la Seine*

*Vienne la nuit, sonne l'heure
Les jours s'en vont, je demeure*

- Ça y est, on est reparti en littérature! se récria Robin, je vois que Grisella a soigneusement évité Malherbe et Lamartine, mais elle en avait d'autres en réserve et si on ne l'arrête pas elle va nous les sortir. Que j'aimerais que l'on parle du temps en termes moins littéraires et moins philosophiques ! Vous appelez ça une enquête ? , si la police menait ses enquêtes de manière aussi fumeuse, elle arrêterait encore moins de coupables qu'elle ne le fait!

⁶ Saint Augustin, *Confessions* 11.14. Garnier-Flammarion 1964

⁷ André Comte-Sponville, *L'Être-Temps. Le temps et sa flèche*, p248. Champs Flammarion 1996

⁸ Guillaume Appolinaire, *Alcools*

- Ouais ! , je suis un peu du même avis !, approuva Noël, car tant qu'on reste sur ce terrain, on a l'impression pénible de se ranger à l'avis du dernier qui parle.

- Eh bien ! à vous de jouer, messieurs les scientifiques qui me considérez comme une piètre détective, que peux-tu dire d'intelligent qui résiste à l'analyse critique, Robin ?

- Tu as dit tout à l'heure qu'il fallait commencer par dire des choses simples sur lesquelles tout le monde ne peut qu'être d'accord, alors j'énonce les choses les plus simples qui soient : le temps ne peut être ressenti sans un changement, comme par exemple la succession des jours et des nuits, des hivers et des étés ; ce temps existentiel peut être appréhendé et mesuré par la description de ce changement à l'aide de lois qui nous permettent de parler du temps de façon quantitative. Les équations qui expriment ces lois précisent la nature évolutive des choses à l'aide d'un paramètre que nous appelons temps. On peut donc définir le temps comme une grandeur pertinente pour décrire l'évolution des phénomènes physiques qui nous entourent.

- Cela me paraît un bon début, approuva Noël, mais qui risque de nous mener tout droit au temps absolu, au temps que depuis toujours, et surtout depuis que Newton l'avait écrit en lettres d'or, on croyait être « *le Temps vrai et mathématique, qui de lui-même et par sa propre nature se déroule uniformément, indépendamment des choses extérieures* », alors qu'aujourd'hui on ne peut plus parler du temps sans parler de son conjoint l'espace et évoquer la théorie de la relativité qui associe allègrement le temps et l'espace à trois dimensions dans un espace-temps à quatre dimensions.

- Ouais !, grogna Robin, leur association a certes toujours été nécessaire pour décrire les phénomènes physiques observables ; il n'existe pas de loi du mouvement qui n'utilise pour sa formulation à la fois les concepts d'espace et de temps. Quant à leur fusion dans un espace-temps à quatre dimensions, c'est tout autre chose car cela implique une équivalence de nature gênante entre ces deux concepts qui nous étaient pourtant apparus jusqu'au vingtième siècle comme des espèces génétiquement différentes, que l'on n'a eu intérêt à amalgamer dans les équations que récemment pour raisonner sur des mouvements à des vitesses approchant celle de la lumière. Dans notre vie quotidienne, le temps et l'espace sont perçus, qu'Einstein le veuille ou non, comme des espèces aussi différentes que la lumière et la matière. Aucun de nos cinq sens ne perçoit directement le temps, alors que notre vue et notre toucher nous font percevoir l'espace, et nous avons encore moins d'expérience sensorielle de cet espace-temps quadridimensionnel où notre imagination nous abandonne.

J'ai une conscience innée de l'espace et du temps comme deux entités fondamentalement différentes et indépendantes : je peux voir et visiter dans tous les sens une région de l'espace, dont les trois dimensions me donnent un sentiment de liberté, je peux retourner au même endroit quand je veux, ce qui me conforte dans ce sentiment de liberté que me donne l'espace, nous pouvons choisir nos chemins dans cette montagne, alors que je ne peux pas retourner au moment où nous regardions se lever le soleil sur le Grand Ferrand. Au contraire de l'espace, le temps s'impose à nous comme unidimensionnel, on ne peut pas s'en écarter, et de plus unidirectionnel, fléché comme un vecteur, ne permettant pas de retour en arrière pour une seconde visite, il impose son déroulement et avec lui un puissant sentiment d'absence totale de liberté. Nous sommes prisonniers du temps.

Le seul point commun entre espace et temps est qu'ils se mesurent tous les deux en intervalles⁹, soit entre deux points, soit entre deux instants, mais il reste que le temps, contrairement à la longueur, est une grandeur orientée : l'intervalle de temps écoulé depuis l'événement A jusqu'à l'événement B est positif si A précède B, négatif si A succède à B, alors que l'intervalle d'espace entre deux points A et B est toujours positif. Si je trace un segment AB avec A à gauche et B à droite, il me suffit de contourner le segment pour voir A

⁹ Roger Balian, *Le temps macroscopique-Le temps et sa flèche*, p159 Flammarion 1996

à droite et B à gauche, alors qu'il n'existe aucune opération de contournement du temps qui permette d'intervertir le passé et l'avenir. Le temps est incontournable.

J'ai du mal à faire mienne la thèse moderne où ce sont les événements qui se présentent en premier et non pas leur mesure, désacralisant l'espace et le temps en termes desquels nous représentons ces événements.

- Voilà une reconnaissance inattendue de ta part des mérites de la littérature, mon cher Robin fit remarquer Grisella, car c'est Ronsard qui avait été un des premiers agitateurs en pressant cette priorité accordée aux événements, intervint Grisella :

*Le temps s'en va, le temps s'en va, ma Dame,
Las le temps non, mais nous nous en allons*

- Eh bien ! mes enfants, je vois que Grisella venge la littérature, intervint le professeur Kirgard, et je constate que vous voilà embarqués sur l'agora des Clausis dans une discussion très athénienne sur la difficulté de mettre de l'ordre entre les convictions issues des perceptions sensorielles et les analyses issues d'une observation plus fine des phénomènes.

Je peux, si vous voulez, tenter de vous aider dans ce questionnement en éclairant un peu ce concept d'espace-temps qui semble faire problème. Je vous dirai d'abord pour vous rassurer que je ressens tout comme vous tous cette différence d'essence entre la catégorie espace et la catégorie temps, il est clair que le temps est distinct de l'espace et c'est un abus de langage que de l'appeler la quatrième dimension. Toutefois reconnaissez que lorsque vous vous donnez un rendez-vous à quelqu'un, il ne vous suffit pas de dire où, ce qui implique un lieu défini par les trois dimensions d'espace, mais aussi quand, quel jour et à quelle heure, ce qui implique une quatrième coordonnée sur la dimension du temps. Tout événement est spécifié par *où* et *quand* il se produit, donc par quatre "paramètres", si vous préférez éviter le terme de "dimension" pour le temps qui vous fait grincer des dents.

Là où le problème commence, c'est qu'avant Einstein, tout le monde avait toujours considéré ces quatre paramètres comme indépendants les uns des autres, et toute la physique Newtonienne décrit le monde avec trois coordonnées spatiales d'un espace euclidien, et une coordonnée de temps indépendante des trois autres et qui est la même pour tous les observateurs du monde.

Ce dont Einstein a pris conscience, c'est que ces paramètres ne sont pas indépendants, mais liés par une certaine parenté, à cause d'un phénomène étrange que les physiciens du dix neuvième siècle ont peu à peu mis à jour par des expériences répétées et concordantes. Ce phénomène bizarre, c'est que la lumière se déplace à la même vitesse de 299.979 kilomètres par seconde par rapport à n'importe quels référentiels imaginables, même en mouvement très rapide les uns par rapport aux autres.

On peut donc dire de la lumière qu'elle se propage à 299.979 km/sec sans spécifier par rapport à quoi, alors que si vous dites que l'avion que j'aperçois là-haut vole à 900 km/heure, cela n'a pas de sens si vous n'ajoutez pas que cette vitesse s'entend par rapport au référentiel du sol d'où nous le regardons.

Considérez alors un train qui roule, et un voyageur dans ce train, qui marche dans le couloir vers l'avant du train ; pour une vache qui les regarde passer, ce voyageur avance un peu plus vite que le train car la vitesse du train et la sienne propre s'ajoutent. Cette additivité des vitesses qui vous a toujours semblé si naturelle était un des piliers de la mécanique newtonienne.

Par contre, si c'est un train de nuit et que ce voyageur s'éclaire d'une lampe de poche pour aller vers l'avant du train, les photons de son pinceau lumineux s'éloignent de lui à 299.979 km/sec, mais la vitesse du train, qui s'ajoutait à la vitesse de la marche du voyageur, ne s'ajoute pas à la vitesse de la lumière qui reste la même dans chacun des référentiels en mouvement les par rapport aux autres, et si la vache avait les moyens d'une mesure précise, elle constaterait, elle aussi, que les photons de la lampe avancent à 299.979 km/sec, pas plus vite que s'ils avaient été émis par une lampe à l'arrêt.

La conséquence de cet état de fait est la disparition de la "simultanéité pour tous". Deux événements simultanés pour un observateur situé dans un référentiel ne sont plus simultanés pour un autre observateur situé dans un autre référentiel en mouvement par rapport au premier.

Cet indice troublant de l'enquête, qui demande un peu de concentration de vos petites cellules grises, a été analysé avec pertinence par l'inspecteur Einstein dans son exemple classique du train roulant sous un orage, frappé par deux coups de foudres sur la tête et la queue du train. Une vache qui regarde passer le train se trouve juste en face du milieu du train au moment où ces deux éclairs s'abattent simultanément sur la tête et la queue du train, et elle les perçoit effectivement simultanés

car la lumière mettra le même temps pour arriver à son œil depuis la tête et depuis la queue puisqu'elle se trouve au milieu à l'instant des deux flashes, donc à des distances égales.

Par contre, un voyageur situé au milieu du train verra, lui, l'éclair de tête un peu avant l'éclair de queue, car pendant que les deux lumières de tête et de queue viennent vers lui à la même vitesse de 299.979 km/sec, il aura un peu avancé avec le train, raccourcissant la distance qui le séparait de l'éclair de tête et allongeant celle qui le séparait de l'éclair de queue ; il percevra donc l'éclair de tête un peu avant l'éclair de queue. Les deux coups de foudre ne sont donc plus simultanés pour le voyageur du train, alors qu'ils le sont pour la vache sur le bord de la voie. Voilà établie la "relativité" de la notion de simultanéité, qui fausse les témoignages et complique donc l'enquête, relativité qui crée ainsi un lien entre le temps et l'espace par le truchement de la vitesse, comme conséquence de la constance absolue de la vitesse de la lumière dans n'importe quel référentiel.

Cette "relativité" de la notion de simultanéité affecte donc directement le concept de temps, qui ne se présente plus comme le temps absolu de Newton, mais comme un temps propre à chaque référentiel. Einstein, qui a été l'Hercule Poirot des enquêteurs sur le temps en passant tous ces phénomènes à la loupe et au scalpel de ses raisonnements perspicaces, a aussi montré que cette relativité de la simultanéité affecte par contrecoup le concept d'espace car la mesure de la longueur d'un objet dépend maintenant de sa vitesse relative par rapport au mesureur, ce qui rend les témoignages encore plus douteux.

Pour rendre plus intuitif ce phénomène, changeons les ordres de grandeur, et supposez que vous soyez, comme la vache, dans un pré devant une voie ferrée, mais dans un monde où la vitesse de la lumière serait de seulement 300 mètres par seconde (comme celle du son dans notre monde), et qu'un TGV arrive à une vitesse de 360 km/h, soit 100 mètres par seconde. Pour vérifier les idées de Einstein, vous vous étiez permis de peindre sur les vitres du TGV deux traits verticaux "avant" et "arrière" à 1000 m l'un de l'autre (d'accord, les TGV actuels ne sont pas aussi longs) bien visibles aussi bien de l'extérieur que de l'intérieur. Muni d'une lunette télescopique et d'un chronomètre, vous déclenchez ce chronomètre au passage du trait "avant"; au passage du trait "arrière", il indique 9,90 secondes, d'où vous concluez que la distance entre les deux traits est seulement de 990 mètres puisque le TGV roule à 100mètres par seconde. Il manque 10 mètres ! Ce sont les 10 mètres parcourus par le TGV dans le dixième de seconde de différence entre les 9,90 secondes mesurées et les 10 secondes attendus qui laissent penser que la règle avait raccourci de 10 cm.,

Un contrôleur des poids et mesures voyageant dans le TGV pourra, lui, vérifier par n'importe quelle mesure mécanique ou optique que le décimètre mesure toujours bien 10 mètres, car il fait partie du référentiel train et avance avec lui, et que la vitesse de la lumière est la même dans les deux référentiels fixe et mobile de la voie et du train.

Notez en passant que l'exemple du train utilisé par Einstein, s'il est valide dans son principe, exigerait bien sûr des mesures de temps et de longueur d'une précision inaccessible pour vérifier les phénomènes de non simultanéité du temps et de raccourcissement de longueur que je viens d'évoquer. Si par contre à la place d'un train, vous imaginez un avion-fusée volant à 98% de la vitesse de la lumière, vous verrez un mètre étalon aligné sur le fuselage mesurer seulement 20 centimètres ; d'ailleurs le fuselage lui-même sera raccourci de 80%.

Kirgard sortit un crayon de sa poche et déplaça une carte IGN pour en utiliser le dos blanc en continuant :

Tout cela est très gênant car chacun était jusqu'alors convaincu que la longueur d'un bâton était une propriété intrinsèque de celui-ci, indépendante des observateurs et des référentiels dans lesquels on la mesurait ; si x, y et z sont les projections de la longueur l du bâton sur n'importe quel référentiel, elles respectaient le théorème de Pythagore $l^2 = x^2 + y^2 + z^2$.

Même si la longueur du bâton était mesurée par deux observateurs se déplaçant l'un par rapport à l'autre à vitesse constante v , par exemple et pour simplifier sur l'axe des x , ceux-ci pensaient trouver la même longueur puisque les abscisses x et x' dans chacun des deux référentiels étaient liées par la relation : $x' = x - v.t$, et que le temps t leur semblait de toute évidence le même pour tous les référentiels car ils n'avaient jamais observé une modification des heures t et t' indiquée par leurs montres respectives lorsqu'ils séparaient leurs référentiels en partant en voyage et se retrouvaient ensuite, ils pensaient donc que $t = t'$.

Ces transformations de coordonnées ($x' = x - v.t$, $y = y'$, $z = z'$ et $t = t'$) s'appellent les transformations de Galilée. La science a parfaitement vécu avec elles jusqu'en 1905, et elles sont encore parfaites pour toutes les sciences de l'ingénieur, pour les trains, et même pour le spatial proche.

Einstein prit donc conscience que la métrique galiléenne n'était pas aussi parfaite qu'on le croyait puisqu'un bâton semblait avoir plusieurs longueurs, une à l'arrêt et d'autres aux très grandes vitesses. Comme il croyait en une Réalité "en soi", il ne pensait pas que le bâton se raccourcissait réellement en approchant la vitesse de la lumière, mais était persuadé que c'était un effet d'optique, un tour joué par la vitesse finie de la lumière et sa constance dans tous les référentiels, et comme il était aussi un fervent démocrate, il pensait qu'aucun observateur ne devait être privilégié et que toute mesure de tout phénomène physique devait conduire au même résultat pour tout observateur, qu'il soit assis dans son fauteuil ou à cheval sur un bâton de sorcière approchant la vitesse de la lumière.

Il se demanda alors par quoi il faudrait remplacer les transformations de Galilée pour permettre d'obtenir les mêmes mesures d'un même phénomène physique défini par (x, y, z, t) dans un référentiel, et par (x', y', z', t') dans un autre, tout en respectant le caractère invariant de la vitesse de la lumière dans chacun de ces référentiels. Il trouva la réponse dans les transformations dites de Lorentz.

J'aurais voulu éviter d'écrire des formules, mais je n'en vois guère la possibilité si on veut être clair, alors je vais essayer de faire tenir ces transformations sur le dos de cette carte. En ce qui concerne l'espace, bien sûr $y' = y$ et $z' = z$ dans notre hypothèse simplificatrice de déplacement sur x seulement, mais :

$$x' = \frac{x - v.t}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \text{et inversement} \quad x = \frac{x' + v.t'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

En ce qui concerne le temps, ces transformations de coordonnées s'écrivent :

$$t' = \frac{t - v \cdot x / c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \text{et} \quad t = \frac{t' + v \cdot x' / c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Cette relativité des mesures de temps et d'espace, qui est la reconnaissance de l'impossibilité de définir le même "maintenant" partout, traduit en fait l'impossibilité d'une action immédiate à distance, qui exigerait que c soit infini ; dans cette hypothèse, vous constatez en effet que les transformations de Lorentz se ramèneraient à celles de Galilée. Notez pourtant que cette "action immédiate" n'avait pas jusqu'alors choqué les esprits et constitue la base de la très célèbre théorie de la gravitation de Newton.

Cette théorie de la relativité fut une révolution culturelle pour tous les scientifiques qui avaient si profondément ancrée en eux l'idée d'un temps unique identique pour tous, mais cette notion révolutionnaire expliquait correctement l'erreur de parallaxe qui faisait percevoir le bâton plus court à grande vitesse. Ai-je réussi à clarifier un peu le paysage ?

- Ouais, un peu, dit Robin, alors le bâton ne se raccourcit pas vraiment en allant vite, c'est plutôt un effet d'optique.

- Oui, comme quand tu regardes une règle en biais, tu la vois plus courte que lorsque tu la regardes en face, ou mieux, pour être plus proche de notre cas, tu ne demanderais pas quelle est la taille réelle de l'ombre de quelqu'un, parce que c'est la projection d'un objet tridimensionnel sur un plan bidimensionnel, et sa longueur peut être différente suivant qu'elle se projette sur le sol ou sur un mur. De la même manière, on ne peut prétendre mesurer la longueur d'un objet appartenant à un référentiel d'espace-temps quadridimensionnel par sa seule projection sur l'espace à trois dimensions d'un autre référentiel d'espace-temps qui possède quatre dimensions, car cette projection est différente suivant le temps propre de chaque référentiel, qui dépend de la vitesse relative des deux référentiels.

Pour achever de te convaincre que c'est bien un effet d'optique, note d'ailleurs la parfaite symétrie de la situation : si deux avions-fusées de science-fiction identiques se croisent à une vitesse relative de 98% de la vitesse de la lumière, chaque pilote verra à travers son cockpit le fuselage de l'autre raccourci de 80% par rapport au sien, et si l'avion pouvait basculer de 90 degrés et voler de travers, ce seraient les ailes qui lui sembleraient raccourcies, alors que le fuselage reprendrait sa taille normale.

La longueur d'un objet est maximum vue du référentiel par rapport auquel cet objet est fixe, pour tous les autres, elle est plus courte dans le sens de la vitesse. Si l_0 est cette longueur maximum, sa longueur l mesurée dans tout autre référentiel se déplaçant à la vitesse v par rapport au premier sera : $l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$

Si on revient un instant sur la relativité du temps, vous constatez sur les transformations de Lorentz qu'au contraire des longueurs, un intervalle de temps donné est le plus court lorsqu'il est mesuré dans un référentiel fixe par rapport à cette horloge, il est plus long s'il est mesuré depuis tout autre référentiel mobile par rapport à l'horloge.

A l'inverse de la longueur l_0 qui raccourcissait, une durée t_0 mesurée dans le référentiel pour lequel l'horloge est fixe, sera mesurée dans tout autre référentiel se déplaçant à la vitesse v par rapport au premier par une durée plus grande t telle que

$$t = t_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

C'est ce qui explique le vieillissement plus lent du célèbre jumeau qui voyage en fusée par rapport à son frère resté à terre.

Si ce ralentissement du vieillissement n'est pas commode à vérifier avec les jumeaux, il est par contre tout à fait mesurable sur des particules subatomiques instables, de durée de vie très courte, et il est couramment observé dans les laboratoires que leur durée de vie apparente est d'autant plus grande qu'elles se déplacent plus rapidement par rapport à l'observateur.

Une particule se déplaçant à une vitesse de 99% de la vitesse de la lumière, présente pour l'observateur extérieur fixe une durée de vie apparente sept fois plus longue. On a même pu produire des faisceaux de mésons pi dont la durée de vie dans leur référentiel propre est de l'ordre de 10^{-8} s, qui, à une vitesse de 0,99995 c ont présenté une durée de vie 100 fois plus longue, ce qui est très utile aux expérimentateurs qui disposent ainsi d'un temps d'observation plus long que la durée de vie de ces particules dans leur propre référentiel. De même les muons créés par le choc des particules cosmiques dans la haute atmosphère à 20 km du sol ont une durée de vie de l'ordre de 2 microsecondes dans leur propre référentiel, qui, même voyageant à une vitesse proche de celle de la lumière, ne leur permettrait de franchir qu'un demi kilomètre, or on en retrouve pourtant beaucoup en montagne à 2000 ou 3000 mètres. Cette anomalie apparente se dissipe lorsqu'on comprend que la durée

de vie du muon vue de la terre est 30 fois plus longue, ce qui lui permet de franchir non plus 500 à 600 mètres, mais 15 à 18 km et d'atteindre le sol. Du point de vue du muon, c'est la profondeur d'atmosphère à pénétrer qui est raccourcie d'un facteur 30, ce qui lui permet d'atteindre le sol dans son temps de vie propre de 2 microsecondes.

Il faut donc bien comprendre que le sujet mobile n'a pas conscience de ce ralentissement du temps ; si on revient au voyageur jumeau qui n'a vieilli que de 7 ans pendant que son frère au sol a vieilli de 30 ans, il n'a pas "vécu plus" que son frère en 7 ans car tout son métabolisme a été ralenti dans le rapport 7/30. Le temps qui semble malléable, c'est seulement le temps des autres, et de même pour l'espace qui reste immuable dans le référentiel du voyageur, mais semble déformé pour les autres observateurs.

Si on passe à la limite, c'est à dire si on considère le photon lui-même qui file à la vitesse de la lumière, une durée t_0 dans son propre référentiel est reliée à la durée observée par un expérimentateur sur terre t par la même relation, simplement inversée :

$$t_0 = t\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Comme la vitesse du photon est égale à c , on en tire $t_0=0$, ce qui signifie que vu du photon, le ralentissement est si grand que le temps ne s'écoule plus : toute durée est nulle pour un photon

Hier soir lorsque vous regardiez la nébuleuse d'Andromède, vous n'avez pas réalisé que pour les photons qui sont venus impressionner votre rétine après deux millions d'années de voyage, ces deux millions d'années ont compté pour zéro ; de leur point de vue, ils sont venus instantanément sur votre rétine.

Le temps et le mouvement dans le temps n'ont pas de signification pour les photons, ils sont à la fois dans le passé, le présent et l'avenir.

- Quelle embrouille! interrompit Noël: Grisella, tu devrais signaler cette performance du photon à Jean d'Ormesson, il pourrait compléter ses oeuvres en écrivant de jolies choses sur les photons qui surfent sur la crête des plus hautes vagues du temps, d'où ils ont une vue totale sur l'océan des temps passés et à venir.

- Ce n'est pas une embrouille, c'est une clarification, car cette théorie de la Relativité, dite "Restreinte", dont vous avez eu des aperçus dans vos études, simplifie la description des événements observables parce qu'elle permet d'établir une mesure universelle incontestable de ce qu'on appelle "l'intervalle" d entre deux événements se passant en des lieux et des temps différents, qui est une généralisation de la distance l séparant deux points de l'espace et de la différence de temps t séparant deux instants. La définition de cet intervalle d est donnée par $d^2 = (ct)^2 - l^2$.

Cette mesure de l'intervalle entre deux événements est une bonne mesure car elle ne dépend plus ni de la position ni maintenant de la vitesse de l'observateur qui fait la mesure dans son référentiel particulier, même si ce référentiel se déplace à une vitesse très proche de celle de la lumière par rapport à n'importe quel autre ; elle répond donc cette fois à tous les critères exigibles d'une bonne mesure scientifique et introduit une simplification cruciale dans la description des phénomènes. On a certes perdu l'immuabilité du temps et de l'espace, qui n'était qu'intuitive et approchée, mais gagné l'universalité des lois physiques.

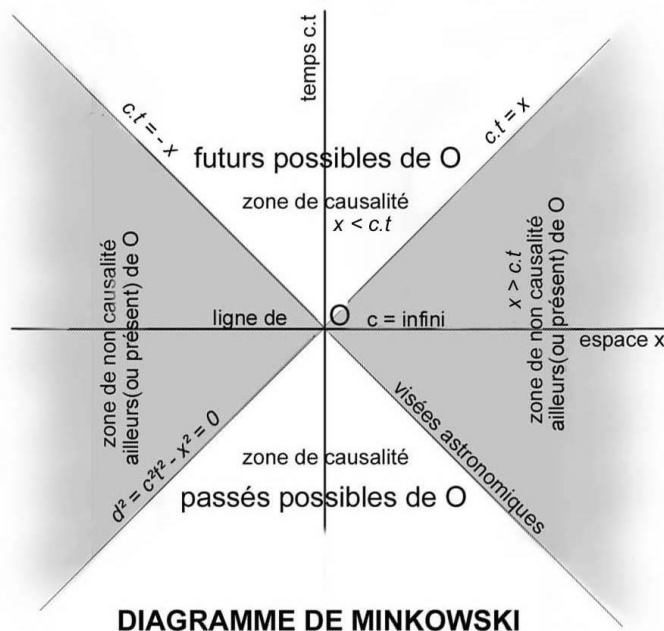
Vous devez commencer à vous convaincre que le temps peut effectivement être considéré comme la quatrième dimension d'un "espace-temps", puisque de même qu'un rendez-vous précis exige quatre coordonnées (3 d'espace et 1 de temps), un corps en mouvement voyage à la fois dans l'espace et dans le temps ; s'il est à l'arrêt dans votre référentiel, il continue tout de même à voyager dans le temps puisque le temps s'écoule.

J'en arrive alors à la réconciliation des impressions sensorielles et de la subtile enquête einsteinienne en soulignant que cet apparent théorème de Pythagore généralisé qu'est $d^2 = (ct)^2 - l^2 = (ct)^2 - x^2 - y^2 - z^2$ en est un faux, qui se différencie du vrai par le signe "moins". Ce signe moins, qui nous est imposé par le nécessaire respect des faits observés, est une espèce de "signature" (+ - - -) de l'univers dans lequel nous vivons. Mais si vous tenez vraiment à vous raccrocher à ce cher Pythagore et avoir les mêmes signes partout, vous pouvez aussi considérer que le temps est une grandeur "imaginaire", au sens mathématique du terme, c'est à dire de la forme $t = i.t$, et puisque $i^2 = -1$, tous les termes de la parenthèse prennent le même signe, ce qui ressemble davantage à Pythagore.

Donc vous voyez que l'espace-temps de la relativité, qui est construit pour permettre une description rigoureuse de tous les événements observables, même très rapides, conduit à ne plus considérer l'espace et le temps comme des entités totalement indépendantes, mais parentes sans toutefois être frères comme le sont les trois dimensions de l'espace, puisqu'on est obligé d'attribuer un caractère "imaginaire" au temps pour le faire rentrer dans un cadre Pythagoricien.

Cet intrigant signe moins qui constitue la "signature" de notre univers reste une question philosophiquement fondamentale : à cause de ce signe moins, aucun signal ne peut remonter vers le passé au sein de l'espace-temps, le signe moins isole le passé du présent et assure qu'aucun événement futur ne peut modifier le présent ou le passé. Il est parent de la causalité et conditionne l'évolution irréversible de chacun de nous de la naissance à la mort.

Minkowski a introduit une représentation graphique intéressante des intervalles entre événements que je vais essayer de faire tenir sur ce qui reste du dos de cette carte, en conservant notre convention de ne considérer qu'une seule dimension x de l'espace pour simplifier le dessin. Si je porte en abscisse cet espace Ox et en ordonnée le temps Ot , ou plus exactement Oct qui exprime le temps en kilomètres avec la même unité que l'abscisse x , les déplacements dans l'espace seront représentés par des points de l'abscisse, et les déplacements dans le temps par des points de l'ordonnée.



La définition de l'intervalle entre deux événements s'exprime ici par $d^2 = c^2 t^2 - x^2$, soit $(c.t+x).(c.t-x)$. Ces intervalles sont donc nuls pour $c.t = \pm x$, c'est à dire sur les bissectrices à 45 degrés des quatre cadrans, c'est donc sur ces deux droites que sont situés tous les événements qui peuvent être reliés par un rayon lumineux, comme par exemple les observations astronomiques.

Entre l'axe du temps et ces deux droites se situent les événements x,t qui sont séparés de l'événement $O(0,0)$ par une distance x inférieure à $c.t$; ces événements peuvent donc être reliés par une information circulant à une vitesse inférieure à celle de la lumière, et donc s'influencer mutuellement par un lien de causalité : O peut être une cause de tous les événements situés du côté des temps positifs, qui constitue le côté des "futurs" possibles de O ; O peut de même être la conséquence d'un événement situé du côté des temps négatifs, qui délimite les "passés" possibles de O .

Entre l'axe de l'espace et ces mêmes deux droites se situent tous les événements qui sont séparés de O par une distance x supérieure à celle, $c.t$, que peut parcourir la lumière dans le temps t , qui est la plus grande vitesse possible de transmission d'une information. Il n'existe donc aucune possibilité pour ces événements d'avoir un lien de causalité avec O , c'est la zone de "l'ailleurs" de O , qu'on peut encore appeler le "présent" de O , car tout événement survenant dans cette zone ne peut pas être connu de O . Nul ne peut savoir ce qui se passe actuellement dans une galaxie située à un milliard d'années lumière, que sa lumière nous dépeint seulement telle qu'elle était il y a un milliard d'années.

Supposez un instant que la vitesse maximum d'information, qui est celle de la lumière c puisse croître au-delà de 299.979 km/sec, les droites $x = \pm c.t$ se coucheraient sur l'axe des x , et la surface de la zone de causalité s'élargirait ; si c était infini, elle s'étendrait à tout l'espace, le demi-plan inférieur constituant le passé et le demi-plan supérieur le futur ; seul l'axe des x , qui représente les événements qui pourraient être connectés si la vitesse de la lumière était infinie séparerait le passé de l'avenir, ce qui donnerait une image fidèle de ce présent instantané tel que Grisella l'imaginait il y a un instant, coupure entre passé et avenir dont vous voyez très bien l'image sur ce diagramme de Minkowski par l'axe des x .

En fait, le présent est plus étendu que cette coupure de l'axe des x qui correspond à $c=\infty$, tous les points de "ailleurs" qui correspondent à des vitesses d'information comprises entre 299.979 km/sec et l'infini font donc partie de ce "présent ailleurs" dont O ne peut avoir connaissance.

Cette coupure du temps se déplace continuellement vers le haut, ce diagramme de Minkowski est un diagramme fuyant, dont l'abscisse remonte sans cesse à 299.979 km/sec. Chaque point d'espace de l'univers transporte son propre diagramme autour de son propre point O , mais tous fuient vers le haut à la même vitesse; ainsi que le disait Robin tout à l'heure, "le temps m'impose son déroulement et me donne un sentiment d'absence totale de liberté".

Abandonnons ces aspects de la cinématique du temps et de l'espace pour en aborder la dynamique. Vous savez qu'aux approches de la vitesse de la lumière, il n'y a pas que la longueur et le temps qui sont affectés, la masse l'est aussi ; la très classique loi de Newton $f = m.a$ qui laisse croire faussement que l'on peut atteindre une vitesse aussi grande que l'on souhaite en appliquant à un corps de masse m une force quelconque f pendant un temps suffisant, est mise en échec. Dommage, car cela nous permettrait de réaliser des voyages intersidéraux ! Mais lorsque la vitesse s'approche de celle de la lumière, la force appliquée au corps cesse de provoquer son accélération, un nouvel effet apparaît : tout se passe comme si la masse croissait, et l'accélération se ralentit, jusqu'à interdire d'atteindre la vitesse de la lumière, qui n'est accessible qu'aux particules sans masse, les photons. La formule qui donne la masse apparente relativiste en fonction de la masse au repos et de la vitesse est

$$m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Si vous n'êtes pas trop assommés par le sujet, je dois aussi vous rappeler qu'une désacralisation encore bien plus totale des images anciennes d'espace et de temps est survenue avec la théorie de la Relativité Générale sortie en 1915 du cerveau du même enquêteur Einstein, qui d'une manière radicalement matérialiste, considère que l'espace-temps ne peut pas être un cadre indépendant de la matière qu'il contient (ou de l'énergie, ce qui est la même chose puisque $E = m.c^2$), mais que sa métrique est fonction de la densité de matière qu'il contient, qui définit localement une sorte de "courbure" de l'espace-temps.

Cette nouvelle vision démolit encore un peu plus le temps absolu, car l'écoulement du temps à proximité de masses importantes de matière, qui "courbent" localement l'espace-temps, est plus lent que loin de ces masses où l'espace-temps est plus "plat". Cela signifie que si Robin passe un an au niveau de la mer pendant que Noël passe la même année au sommet du mont blanc, Robin aura moins vieilli que Noël, en supposant évidemment tous les autres paramètres identiques car cet écart de vieillissement est de l'ordre d'une fraction infime de microseconde.

C'est d'ailleurs là une source intéressante de polémiques encore actuelles sur le paradoxe des jumeaux dans des groupes de discussion d'universitaires américains que vous pouvez trouver sur l'Internet en cliquant sur le mot-clef *twin paradox*, car le voyage sidéral de l'un d'eux à vitesse proche de celle de la lumière ne peut évidemment se faire sans fortes accélérations, et une force d'accélération ne se distingue pas d'une force de gravité, donc les causes de la différence de vieillissement des jumeaux sont en fait de deux origines, l'une liée aux accélérations, expliquée par la Relativité Générale, l'autre liée à la différence des vitesses des référentiels, expliquée par la Relativité Restreinte.

La courbure de l'espace-temps courbe aussi la lumière, qui se propage en choisissant le temps minimum pour un parcours donné suivant le principe de Fermat, donc la distance la plus courte d'un point à un autre, qui en première approche est la ligne droite, géodésique de l'espace euclidien dans lequel nous pensions être, mais dans l'espace-temps réel courbé par la présence de masses, la lumière se déplace en suivant les géodésiques de cet espace-temps courbe, qui remplacent la ligne droite de l'espace euclidien.

Le phénomène a été vérifié en 1919, seulement quatre ans après l'invention de la Relativité Générale, par Eddington au cours d'une éclipse totale de soleil où il a pu observer une étoile qui aurait du normalement être masquée par le disque solaire si la lumière se déplaçait en ligne droite, et qui apparaissait visiblement au bord du disque du soleil noir, car le trajet de la lumière de l'étoile était courbé au voisinage de la masse du soleil et révélait l'étoile cachée derrière, ce qui fut un éclatante démonstration de la théorie d'Einstein.

Avec cette nouvelle vision, les forces de gravitation universelle chères à Newton prennent également un aspect différent : de même que dans l'espace galiléen, un corps animé d'une

vitesse v et non soumis à une force se déplace comme la lumière en ligne droite, géodésique de l'espace euclidien, dans l'espace-temps courbé par la présence de masses, un corps se déplace en suivant les géodésiques de cet espace-temps courbe. Au lieu de dire comme Newton qu'une planète tourne sur une orbite fixe autour du soleil parce qu'il y a équilibre entre la force centrifuge qui tend à l'expulser de son orbite et la force de gravitation qui tend à l'écraser contre le soleil, on peut ne pas parler des forces en présence, et dire que la planète suit son trajet naturel qui est simplement une géodésique de l'espace-temps courbé par la masse du soleil. Dans cet espace-temps courbe, ce trajet se referme sur lui-même, alors que dans l'espace-temps plat galiléen hors de toutes masses, le trajet en ligne droite d'un objet libre ne se referme pas, sinon à l'infini.

Vous voyez qu'on peut dire pour résumer que la matière/énergie dicte sa loi à l'espace-temps en lui imposant la manière dont il doit se courber et que l'espace-temps dicte à la matière comment elle doit se mouvoir.

La distinction newtonienne entre le contenant et le contenu est donc totalement abolie puisque les propriétés du contenant dépendent du contenu ; la métrique de l'espace-temps n'est plus universelle, mais définie localement par son contenu en matière/énergie. On est donc loin de la conception d'un "espace-cadre" géométrique universel à trois dimensions, continu, homogène et isotrope et d'un "temps-cadre" unique et universel.

- Mais c'est un point de vue existentialiste : l'existence précède l'essence, souligna Grisella.

- C'est vrai. J'ajouterai un petit complément enfin, au sujet de la pertinence du temps comme grandeur permettant de décrire l'évolution des phénomènes ; cette pertinence a une limite du côté du début de l'univers : hier soir, je vous ai résumé le scénario probable du commencement du monde et vous avez dû noter que j'ai débuté la description à 10^{-43} seconde. Ceci résulte d'une incompatibilité entre la théorie de la relativité, qui décrit correctement les phénomènes cosmiques, massifs à grande échelle, et la théorie quantique, qui décrit le monde microscopique. Au début des temps, ce monde était à la fois microscopique et très massif. Pour des densités supérieures à une valeur appelée densité de Planck, de l'ordre de 10^{96} kg/m³, les effets quantiques et gravitationnels se mêlent d'une manière que nous ne savons pas encore décrire ; le moment où l'univers avait cette densité correspond à 10^{-43} seconde et est nommé temps de Planck, en deçà duquel nous ne savons plus rien dire, donc on se tait, car comme l'a dit le philosophe Wittgenstein, "ce dont on ne peut parler, on doit le taire".

Les enquêteurs qui éprouvent un besoin irréprouvable de réfléchir à l'origine du monde doivent être conscients de cette limite en deçà de laquelle on ne sait même pas si le mot précéder conserve un sens. Il est possible que l'origine de l'univers se confonde avec l'instant de Planck, il est possible que cette origine se situe plus loin dans le passé, il est possible que l'univers existe depuis une durée infinie, peut-être n'y a-t-il pas d'origine ? On ne peut concevoir l'origine de l'univers par une approche scientifique puisque l'espace et le temps qui sont les aspects mesurables de la substance universelle, font partie de cet univers et n'existent pas hors de lui.

La notion de causalité qui structure toutes nos enquêtes n'a de sens que si le temps existe, car la cause *précède* l'effet. "Dieu créa l'univers" n'a pas de sens si le temps est apparu en même temps que l'univers.

Je peux vous citer Marc Lachièze-Rey¹⁰ qui a très bien indiqué la limite du discours : « Considérer scientifiquement ce qui existait avant et même au temps zéro n'est pas possible puisqu'on devrait le penser dans un cadre où l'espace et le temps n'existaient pas encore ; nous ne disposons pas d'un tel cadre, car sans espace et sans temps, nous ne pouvons faire de science, nous ne pouvons donc pas penser l'événement "début de

¹⁰ Marc Lachièze-Rey, *A la recherche du temps cosmique-Le temps et sa flèche*. Champs Flammarion 1996

l'univers". Nous sommes clairement dépourvus du cadre conceptuel permettant de parler d'éventuelle naissance de l'univers ; le processus fondateur, s'il en existe un, n'a pu se dérouler dans le cadre de l'univers puisqu'il a abouti précisément à créer ce cadre ; il n'a pu se dérouler dans le temps puisque l'existence du temps implique déjà celle de l'univers. Imaginer le contraire conduit vite à des paradoxes, car s'il y avait eu quelque chose avant le début de l'univers, l'univers aurait été déjà là, par définition, et il ne se serait pas agi de son début ».

- Mon vertige me reprend, gémit Grisella, et je constate que notre enquête débouche sur la découverte d'un gang temps-espace-matière indissociable, alors que l'on espérait pouvoir les prendre en filature séparément. On devrait peut-être abandonner cette enquête, car dès les premiers indices, on trouve des faux-nez.

- Effectivement, le temps est peut-être un faux nez, on peut aussi imaginer que Dieu et sa création sont hors du temps, dit Noël, et que c'est nous qui percevons cette création comme une suite d'événements s'écoulant dans le temps alors qu'ils sont simultanés pour le créateur¹¹, un peu comme le photon qui vient d'Andromède en un temps nul pour lui, alors que nous le percevons comme deux millions d'années.

- Mais, Noël, si toute la création passée, présente et future était donnée d'un seul coup par le créateur, reprit Grisella, cela signifierait un déterminisme total sur ce que nous appelons notre futur, une prédestination qui rendrait assez vain tout effort d'amélioration de l'homme. N'est-ce pas le jansénisme ?

- Au secours, j'ai mal à la tête, coupa Robin en se relevant, ne pensez-vous pas qu'on devrait arrêter de philosopher et reprendre la marche ? Je remplis mes poumons d'une grande bouffée d'air frais pour libérer mon esprit des concepts, et je décrète le départ.

- Tout compte fait, on aurait peut-être mieux fait de parler de la beauté des ammonites, grogna Noël.

- OK ! on y va, approuva le reste de la troupe.



Tout est parfait dans le meilleur des mondes

possibles !

¹¹ Matthieu Ricard, Trinh Xuan Than *L'infini dans la paume de la main* p85 Fayard 2000

Le soleil avait grimpé pendant cette pause un peu prolongée, et une douce torpeur les envahit au cours de la marche silencieuse qui suivit ; peut-être certains méditaient-ils sur le concept de temps, ou peut-être plutôt trouvaient-ils dans cette marche calme un petit complément à leur nuit trop courte.

Le terrain était facile à ce niveau des prairies retrouvées, succession de bosses et de cirques au creux desquels l'orage récent avait fait naître un filet d'eau temporaire ; les insectes réveillés bourdonnaient dans les herbes. De temps à autre, le sifflement d'une marmotte faisait lever la tête aux marcheurs pour essayer de la repérer.

Ils attaquèrent bientôt des pentes plus continues et plus raides, où les touffes d'herbes devenaient sporadiques, séparées par des langues de terre érodée ou des roches, puis ils retrouvèrent les pierriers si agréables à la descente, mais si pénibles à la montée avec leurs pierres instables. Deux pas en avant, un pas en arrière, on avance à pas de pèlerin dans le bruit de vaisselle cassée des pierres qui dévalent.

- La grotte des Clausis est en vue, annonça Robin au détour d'un piton de rocaille, encore une petite heure de marche et nous y serons.

Un peu au-dessus du pied de la falaise qui dominait de son à-pic les grands pierriers, on apercevait l'entrée de la grotte, trou noir dans la falaise blanche ; les dernières centaines de mètres seraient difficiles, car des éboulis récents avaient accumulé des rochers dans un passage étroit et un peu vertigineux.

Une heure plus tard, le passage fut franchi sous une nuée de choucas criards, dont beaucoup avaient établi leurs pénates dans la grotte ou dans les anfractuosités voisines de la falaise, et s'estimaient dérangés par ces visiteurs inhabituels.

Les sacs à dos tombèrent des épaules à l'entrée de la grotte, et tous se retrouvèrent assis en tailleur le dos à la falaise, face au splendide paysage en trois dimensions avec le vide devant eux sur un fond de montagnes ensoleillées qui meublaient tout leur horizon, dominées un peu à droite par le grand Ferrand d'où ils venaient de contempler le lever du soleil.

Après un quart d'heure de relaxation face à ce vide devant la toile de fond des montagnes, les torches électriques sortirent des sacs et une visite de la grotte s'imposa ; ce n'était pas la première fois qu'ils y entraient, mais d'un an à l'autre les stalactites et stalagmites de glace variaient en taille selon la rigueur de l'hiver précédent. Ils retrouvèrent le gros stalagmite central avec sa glace bleue et ses multiples pointes dressées vers le plafond de la grotte où un lustre de stalactites plus petits brillait dans la lumière des torches. Ils avancèrent prudemment vers le fond de la grotte dont ils ne savaient pas où il conduisait, n'étant jamais venus là avec l'équipement nécessaire en cordes pour s'aventurer sur cette pente d'épaisse glace bleutée s'enfonçant dans un obscur inconnu.

- Il faudra penser à emmener le matériel nécessaire pour explorer le fond à notre prochain passage, dit Robin, chaque fois on oublie.

- J'ai une petite faim, risqua le professeur Kirgard, ne croyez-vous pas qu'il serait temps de se restaurer ?

Lorsqu'ils sortirent de la grotte, le soleil était au zénith ; ils s'installèrent sur le seul petit carré d'herbe rase et de cailloux couvrant quelques mètres devant l'entrée. Les choucas tournaient dans le ciel bleu en piaillant.

Après cette courte nuit et la marche de la matinée, l'appétit était aiguisé et les provisions de route furent sérieusement écornées.

- Une sieste s'impose, proposa Kirgard repu en s'allongeant sur le dos.

Les trois jeunes gens restèrent assis face au vide, conjuguant digestion et contemplation.

- Quel va être notre prochain vertige intellectuel ? risqua Grisella.
- Tu n'as pas assez du vertige physique de ce paysage en 3D, avec ce vide sous nos pieds ?

- Eh bien voilà ! tu viens de trouver le sujet, Robin, cela pourrait être 3D ; on s'est tous creusé la tête ce matin pour essayer de mieux saisir la signification du temps et les relations espace-temps, mais tout le monde semble avoir considéré que si le temps posait des problèmes de compréhension, l'espace par contre n'en posait aucun : Je t'entends encore, Robin, déclarer que tu avais de notre espace à trois dimensions une expérience sensorielle directe par la vue et le toucher, mais chacun de nous est tellement familiarisé avec cet espace à trois dimensions que jamais on ne se pose la question : Pourquoi 3D ? Voilà le sujet que je vous propose pour la sieste, pourquoi l'univers a-t-il été fait en 3D ? On pourrait prendre en filature le deuxième suspect de ce gang temps-espace-matière, cela pourra peut-être nous apporter quelques indices nouveaux pour notre enquête si nous avons le courage de la poursuivre. Je sais que tu aimes les polars où l'on s'imprègne de l'ambiance : avec Robert van Gulik et son juge Ti, on s'imprègne de l'ambiance exotique et subtile de la Chine des Tang, avec Harry Kemmelmann, on pénètre avec justesse et humour dans les milieux juifs américains, avec Simenon, c'est la vieille Europe et les mystères de ses provinces profondes et de ses ports du nord, essayons donc de planter l'ambiance de l'espace à trois dimensions pour avancer dans ce grand polar de l'existant!

- Je sens qu'on va s'amuser à faire de la science fiction en essayant d'imaginer ce que pourrait être la vie dans d'autres univers à quatre, cinq ou dix dimensions, c'est plutôt de la science-fiction que du polar, ça plairait à mon petit frère qui adore la S.F., acquiesça Noël.

- Je crois que tu viens de choisir un critère fondamental de sélection des mondes possibles en parlant de ce que pourrait y être la vie, intervint Robin, car qui dit vie dit complexité de l'organisation, existence d'un cerveau pour les plus évolués. Le problème est donc de savoir si d'autres dimensions pourraient permettre une complexité encore plus riche de possibilités.

- Si nous commençons modestement par la dimension zéro, dit Grisella ? C'est un univers-point, nul en possibilités de déplacement et de communication, je doute que quelqu'un se soit donné la peine de créer un univers aussi minable.

Avec une dimension, on peut déjà commencer à bouger un peu, mais seulement le long d'une ligne, les êtres éventuels sont des aiguilles sans épaisseur qui ne peuvent que glisser le long de la ligne constituant leur seul espace de liberté, ils ne peuvent que cogner leurs voisins par l'avant ou par l'arrière, ils ne peuvent ni se dépasser ni se croiser, leurs relations ne dépendent que de ce qu'ils trouvent à l'une ou l'autre de leurs extrémités ; je ne miserais pas un kopeck sur leurs chances d'évolution.

- Avec deux dimensions, ça va déjà nettement mieux, enchaîna Robin, on peut éviter ses voisins, contourner les obstacles, mais la perception de l'environnement reste limitée au voisinage immédiat, sans vue en hauteur, ce qui réduit singulièrement les possibilités de communication. Si on cherche à imaginer comment pourraient s'y développer des êtres vivants qui demandent un nombre incroyable de connexions de toutes sortes, nerveuses, neuronales, cellulaires... on ne voit pas très bien comment pourraient s'organiser ces connexions dans un monde où elles ne peuvent pas se croiser puisqu'il n'y a ni haut ni bas.

Ces connexions courant à plat devraient parcourir des distances considérables pour atteindre leur destination. Si on se réfère à un cerveau humain qui possède environ 10^{11} neurones et 10^{14} synapses, un cerveau plat sans croisement de connexions demanderait la surface d'une ville¹², mais de plus, la plupart des réseaux de connexions à trois dimensions comme celui de notre cerveau ne peuvent topologiquement pas être mis à plat sans croisement.

- On pouvait bien se douter sans grande analyse que des mondes à moins de trois dimensions ne seraient pas très fertiles, coupa Noël, et on sait bien que toutes ces difficultés s'évanouissent dans notre univers à trois dimensions où l'espace peut être parcouru en tous sens, où toutes les rencontres sont possibles, où il est aisé d'établir dans un très petit volume un réseau de connexions transmettant en masse des informations ou des actions sans rencontrer ces problèmes de croisements interdits, et on sait bien par expérience ce que notre monde à trois dimensions a pu produire comme merveilles depuis les dinosaures jusqu'à Grisella.

- Alors voyons plutôt si des univers à quatre ou cinq ou six dimensions spatiales n'auraient pas produit des êtres devant lesquels nous ne serions que de misérables protozoaires, intervint Robin. Un cerveau à quatre, cinq ou six dimensions auraient des possibilités de connexions gigantesques qui en feraient un ordinateur inimaginable ! Quelqu'un a-t-il quelques lumières sur cette perspective ?

L'absence d'écho à cette question montrait qu'il n'y avait pas plus de lumières qu'au fond de la grotte.

- Même Kirgard est sec sur le sujet ! , ou alors il dort, dit Robin en se tournant vers le professeur allongé à l'entrée de la grotte.

- Il n'y a vraiment pas moyen de faire la sieste avec ces jeunes gens, grogna Kirgard, j'ai entendu vos divagations dimensionnelles qui sont plus proches de la science-fiction que de la science et je n'ai pas grand chose à ajouter sur vos mondes hypodimensionnels, mais je peux faire une ou deux remarques que j'ai pu glaner çà et là dans différents articles que je n'ai pas trop cherché à approfondir, sur l'intérêt et les chances d'existence de mondes hyperdimensionnels.

Le professeur parlait couché à l'entrée de la grotte, et sa voix répercutée en écho assourdi par le plafond et les parois de la caverne semblait sortir de la montagne.

- D'abord une remarque sur la différence de comportement des ondes de toutes natures, sonores, électromagnétiques ou autres, selon que l'espace dans lequel elles se propagent est de dimension paire ou impaire. Dans notre espace à trois dimensions, un signal élémentaire tel qu'une impulsion, se propage avec un front abrupt suivi d'une traîne d'amplitude décroissante, elle ne prévient pas de son arrivée et ne laisse aucune trace de son passage après un temps très court ; les communications se font alors sans distorsion. Dans un espace de dimensions paires comme quatre, il paraît que la traîne est beaucoup plus longue et la perturbation durable que laisse chaque signal après son émission brouille les communications et entraîne des distorsions qui réduisent considérablement la perception possible du monde extérieur¹³.

Un autre défaut des dimensions paires est l'impossibilité d'y faire des nœuds. A deux dimensions, c'est évident puisqu'il n'y a ni haut ni bas et que vous ne pouvez donc pas croiser vos fils, mais à quatre, la théorie mathématique montre que c'est impossible aussi, vous pouvez faire des embrouillaminis redoutablement compliqués, mais quand vous tirez dessus, il paraît qu'ils se défont immédiatement ; seuls les nœuds à trois dimensions présentent la propriété de persistance¹.

Vous me direz peut-être qu'on peut vivre sans faire des nœuds, mais le nœud n'est qu'une image allusive à la matière car il semble que l'on puisse considérer les diverses espèces de particules comme des espèces de nœuds d'espace-temps dont la solidité et la persistance ne seraient pas assurée dans un espace à quatre dimensions qui ne pourrait alors contenir de matière durable.

Vous pourriez dire O.K., sautons la dimension 4 puisque les êtres ne pourraient pas communiquer, donc pas évoluer, et que leur solidité ne serait peut-être pas assurée, mais à la dimension 5 les cerveaux possibles seraient encore plus formidables !

¹² Peter A. Atkins, *Comment créer le monde*. Seuil 1993

¹³ Peter A. Atkins, *Comment créer le monde*. Seuil 1993

Ma seconde remarque concerne alors la stabilité des univers de haute dimensionnalité. Dans de tels univers à plus de trois dimensions, j'ai lu dans Stephen Hawking¹⁴ certaines considérations assez pessimistes : dans notre monde en 3 dimensions, la force d'attraction gravitationnelle entre deux corps distants de d est inversement proportionnelle à d^2 , c'est-à-dire d^{3-1} ; pour un nombre de dimensions n , cette force serait inversement proportionnelle à d^{n-1} , donc décroîtrait beaucoup plus rapidement avec la distance qu'elle ne le fait en trois dimensions. Pour une distance double, elle est divisée par 4 dans notre monde, alors qu'elle le serait par 8 dans un monde à 4 dimensions et par 16 à 5 dimensions.

Une conséquence serait que les orbites des planètes deviendraient instables, il suffirait d'infimes perturbations pour les éjecter de leurs orbites, le passage d'une comète par exemple pourrait envoyer une planète se faire griller vers son soleil ou l'envoyer aux confins glacés de l'univers. Toutes les trajectoires seraient spiralées comme les ammonites chères à Noël, et non plus elliptiques stables ; Ce n'est qu'à trois dimensions qu'une petite perturbation ne détruit pas les orbites, à condition que l'impact ne soit pas trop grand. On peut donc craindre que dans de tels mondes instables, la complexité, donc la vie ne dispose pas du temps nécessaire à son établissement et à son développement.

Rappelez-vous que si on admet 15 milliards d'années comme âge de notre univers, notre planète Terre ne s'est formée qu'à 10,5, que la vie n'y est apparue qu'à 11,5, les mammifères à 14,8 et l'homo sapiens à 14,99 ou plus. Le nombre de comètes et de bolides célestes divers qui sont passés à proximité de notre douce planète bleue ou l'ont percutée depuis le fond des âges est considérable et si notre monde avait eu plus de trois dimensions, notre Terre aurait été éjectée de son orbite depuis longtemps et l'homo sapiens n'aurait pas eu le temps d'exister pour se poser ce genre de question.

Une autre conséquence tout à fait analogue à plus petite échelle concerne les atomes : la force électrique qui retient les électrons autour du noyau se comporterait de la même façon que la force gravitationnelle et les électrons pourraient s'échapper de l'atome avec une facilité qui rendrait la viabilité de la matière très incertaine.

Tout cela n'est pas de la science pure et dure, ce sont seulement des indices scientifiques glanés dans des ouvrages paraissant sérieux, qui donnent à penser que des univers de dimensions spatiales supérieures à trois, s'ils avaient été créés, auraient eu très peu de chances de pouvoir contenir de la matière et très peu de chances de survivre et de se développer vers la complexité de la vie. En somme trois dimensions d'espace semblent être le minimum pour la viabilité, et le maximum pour la fiabilité d'un univers.

- On croirait entendre le professeur Pangloss de Candide ou Bernardin de Saint Pierre proclamant que tout est parfait dans le meilleur des mondes possibles, que les nez y sont faits pour porter des lunettes dès qu'on en a besoin, et que les melons y ont des côtes pour être plus facilement découpés au cours des repas de famille, conclut Robin sceptique.

- Et je suppose que c'est la même conclusion pour le temps, osa Grisella, si je reprends comme pour l'espace mon hypothèse initiale d'un temps de dimension zéro, je suis incapable d'imaginer comment des événements pourraient se dérouler si tout est simultané. Si je me trouve dans la cour du Louvre, je ne peux pas y voir simultanément tout ce qui a pu s'y passer au cours des âges : des dinosaures, de la forêt avec des sangliers, des Gaulois, des Romains, les constructions successives du palais, des gentilshommes de cour, des révolutionnaires, des pyramides en verre et des visiteurs japonais qui prennent des photos, seule la dimension "un" du temps permet de rendre possible les phénomènes en les étalant. Je crois que c'est Bergson qui a dit : « A quoi sert le temps ? à empêcher que tout soit donné d'un seul coup, il est élaboration, il est le véhicule de la création et des choix »¹⁵.

Et si maintenant je suppose un temps à deux dimensions ou plus, je peux m'y promener dans tous les sens, il n'y a pas de présent ni de futur, le journal du jour peut porter deux ou plusieurs dates et contenir des reportages sur des événements "ayant eu lieu demain", ce serait la disparition de la causalité qui est une clé de voûte de notre univers et du raisonnement humain. On a déjà bien du mal à mener une enquête avec notre temps unidimensionnel, on ne pourrait jamais rien conclure dans un tel monde.

Donc avec nos trois dimensions d'espace et une seule dimension à sens unique du temps, tout semble effectivement être pour le mieux dans le meilleur des mondes.

- Au soir du sixième jour, Dieu considéra son œuvre, et il vit que cela était très bon, renchérit Noël.

¹⁴ Stephen Hawking *Une brève histoire du temps* p208 Flammarion 1991.

¹⁵ Henry Bergson, *le possible et le réel*. Œuvres, Edition du centenaire 1970.

- J'espère ne pas gâcher cette conclusion euphorique par un petit supplément pervers, rajouta Kirgard, mais je vous informe toutefois que certains physiciens actuels considèrent que cette perception d'un monde à trois dimensions est incomplète et que notre espace-temps est en fait peut-être constitué de 10 dimensions, neuf d'espace et une de temps, dont six d'espace qui sont invisibles à nos yeux, associées deux par deux à chacune de nos trois dimensions d'espace classique pour faire de chacune une espèce de petit tube très fin, à l'échelle de l'ordre de 10^{-33} centimètres¹⁶.

Avec cette théorie qui est apparue dans les années soixante et est en plein développement, ce que nous appelons particules de matière ne seraient plus conçues comme des entités ponctuelles, mais comme des êtres unidimensionnels, des espèces de microcordes enroulées sur elles-mêmes un peu comme des nœuds, en petites boules de 10^{-33} centimètres.

Ces cordes de deux types, soit ouvertes avec deux extrémités, soit fermées en boucle, permettraient de représenter toutes les particules de matière que nous considérons aujourd'hui comme différentes, telles que les électrons, les photons ou les quarks ; seuls les modes de vibration différents de ces cordes constitueraient l'identité de ces particules, en en déterminant la masse et la charge électrique. Et ces cordes ne seraient pas seulement les mêmes pour toutes les particules, mais aussi pour toutes les forces qui les font interagir, comme la force gravitationnelle ou la force électromagnétique. Avouez que c'est une belle image unificatrice !

Ce monde décadimensionnel aurait prévalu dans les toutes premières fractions de microseconde de l'univers, où justement les particules auraient été indifférenciées, puis, lors de la baisse de température, se serait simplifié par rétraction de six dimensions, ne laissant apparaître que les trois auxquelles nous sommes accoutumés.

C'est la théorie des supercordes, qui n'a encore reçu aucune vérification expérimentale, mais permettra peut-être dans les premières décennies de ce siècle de faire un pas de plus vers ce Graal des physiciens qu'est l'unification des théories de la physique. Ce serait une nouvelle manière de penser la matière qui permettrait de rendre compatible la physique quantique dont nous n'avons pas encore parlé, et la physique relativiste que l'on a effleurée ce matin, mais on doit aussi dire que certains physiciens s'impatientent un peu devant la lenteur d'apparition de résultats concrets.

- Si l'univers est fait de bouts de ficelles qui vibrent comme mes cordes de violoncelle, conclut Grisella, c'est une espèce de revanche du monde unidimensionnel que nous venons de traiter avec condescendance s'il envahit nos trois dimensions par ses fantômes filiformes.

- Comme mathématicienne, je m'attendais plutôt à ce que tu dises : Bof ! tout ça n'est que de la mathématique utilisée pour mieux triturer la physique, clama Robin en se remettant sur pied ; en tous cas, j'ai l'impression que le professeur s'amuse à faire des croche-pieds à notre enquête, car quand on croit tenir un indice un peu solide, il semble éprouver un malin plaisir à jeter le doute, alors je crois qu'il est urgent de rompre la sieste, pour autant qu'on puisse appeler ça une sieste. J'aperçois quelques cumulus qui bourgeonnent sur le Ferrand. En route.

Une descente prudente le long de la paroi leur fit retrouver très vite les prairies fleuries et bourdonnantes d'insectes en cet après-midi d'été. Sur une longue partie du trajet, ils reprirent le parcours inverse dans un assoupissement entrecoupé seulement par les cris des choucas qui surveillaient leur marche, et de temps en temps par le sifflement d'une marmotte. Dans le milieu de l'après-midi, ils rejoignirent une croisée de chemins d'où ils prirent le cap nord en direction de ce lac étroit pincé entre deux crêtes, au bord duquel ils avaient prévu de passer la nuit. Toute la fin de la journée fut consacrée à cette longue approche à travers des terrains variés sans grande difficulté.

Ils atteignirent le lac aux derniers rayons du soleil qui, bien qu'encore haut dans le ciel, avait déjà disparu derrière la crête sud-ouest qui surplombait l'eau de ses névés s'étalant jusqu'à la rive où ils venaient mourir en blocs bleutés de glace flottante. A 2500 mètres d'altitude, déjà envahi par l'ombre, ce lac distillait sa froideur aux visiteurs encore tout

¹⁶ Jean-Pierre Baton et Gilles Cohen-Tannoudji, *l'horizon des particules*. NRF essais Gallimard 1997.

échauffés par la marche. Les cumulus de l'après-midi s'étaient dissipés sans orage avec le soir, et cette seconde nuit en montagne serait probablement aussi claire et froide que la première.

- Dommage qu'il n'y ait pas de bois aux environs pour allumer un feu, regretta Noël en dépliant sa tente.

Un minestrone préparé sur le mini-réchaud, suivi de jambon fumé, de fromage de Comté, de bananes et de café brûlant réconfortèrent les corps alanguis par la longue marche, puis chacun se glissa dans son duvet déroulé dans la tente pour limiter la déperdition de chaleur ; seules les quatre têtes dépassaient à travers la glissière des tentes car il était beaucoup trop tôt pour dormir.

À quoi allons nous jouer ce soir, dit Grisella ; hier soir c'est une idée d'enfant qui a amorcé la discussion avec la question de la petite sœur de Noël sur la grandeur de l'univers. Il serait peut-être rafraîchissant de réveiller l'enfant qui sommeille en nous pour essayer de redécouvrir des questions qu'on ne se pose plus parce qu'on s'est accoutumé au monde qui nous entoure.

- Oh ! Grisella, tu n'idéalises pas un peu ? raila Noël ; personnellement, je trouve que c'est une idée reçue de croire que les enfants se posent davantage de questions fondamentales que les adultes ne savent plus se poser. Ce n'est pas parce que ma petite sœur a posé cette question hier qu'il faut s'ébahir sur la profondeur naïve de la pensée enfantine, d'abord parce que ma petite sœur est un peu un cas...

- Euh euh ! on ne se serait jamais douté que tu en pensais tant de bien, vu la manière dont tu la traites quelquefois, ta chère petite sœur.

- Bon ! ça va, je fais simplement son éducation de temps en temps ; ensuite la question qu'elle a posé hier n'avait vraiment rien d'exceptionnel, c'était de la simple curiosité...

- Et voilà comment il se rattrape de sa fugitive pensée admirative envers sa sœurette !

- Arrêtez de me charrier, je maintiens donc que ce n'était pas une question exceptionnelle pour un enfant, c'était loin d'une réflexion sur les trois dimensions de l'espace et l'unique dimension du temps ; ça, ce sont des questions d'adultes qui ont pris le temps de méditer un peu sur le constat, un enfant normal a plutôt tendance à collectionner les observations, à les classer, sans trop se poser de questions sur la raison profonde des faits qu'il observe. Il dit : ça c'est un éléphant, ça c'est un cheval, ça c'est un chien, ça c'est un oiseau, ce sont tous des animaux, il développe plutôt une affectivité vis à vis d'eux, mais ne se pose pas tellement de questions sur ce qu'est la vie et sur ce qui différencie les êtres vivants des cailloux, il ingère tout cela comme des données de fait.

Mais stoppons là cette digression hors sujet sur la pensée des enfants, ce qu'a voulu dire Grisella, c'est simplement d'essayer de gratter un peu dans nos accoutumances pour y déterrer des questions qu'on ne se pose pas souvent dans le tohu-bohu de la vie quotidienne.

- Je vois, renvoya Robin, « to be or not to be », je sens qu'on va rejouer les intellos de service sur les grands thèmes classiques « je pense, donc je suis ». Qu'est-ce qui "est" ? Qu'est-ce qui "n'est pas" ?, "pourquoi y a-t-il quelque chose plutôt que rien" ?

- Eh bien voilà ! , enchaîna Grisella, pourquoi pas ce sujet prétentieux ? C'est encore Robin qui lance la balle malgré ses réticences affichées sur ce genre de passe-temps.

- Moi ! j'évite de philosopher sur ce qui "est" et ce qui "n'est pas", rechigna Robin, et je donne des réponses au ras des pâquerettes, pratiques et approchées à l'aide de mes cinq sens. Si je les interroge, ils répondent : il y a de la matière dont vous et moi sommes faits aussi bien que cette montagne et ce lac, parce que je les vois et parce que je sens les cailloux sous mon tapis de sol, il y a de la lumière qui me permet de voir cette matière, il y a des sons comme cette eau qui ruisselle et que j'entends par mes oreilles, des odeurs comme celle de la cigarette du professeur qui nous pollue l'air pur, des saveurs comme celle du café que j'ai encore dans la bouche, mais quand je mouline tout ça dans mon cerveau, il me dit que la lumière, les sons, les odeurs, les saveurs ne lui semblent pas des "êtres" durables, mais plutôt à classer dans la catégorie des apparences qui résultent des interférences momentanées avec nos organes des sens, tandis que la matière, ça c'est vraiment de l'"être" par essence, solide et indépendant de sa détection par nos sens, plus durable qu'un son ou une odeur.

- Voilà tout Robin, nota Grisella, il rechigne sur la philosophie, mais de fait il en a épousé une sans le savoir, qui est celle de Husserl, si j'ai bien digéré mes quelques connaissances dans ce domaine, qui déclare voir la plus profonde réalité dans les perceptions immédiates et non analysées, qui ont la saveur inimitable du vécu.

- Va pour husserlien, si c'est le chapeau que vous m'attribuez.

- Je vais m'amuser à jouer la philosophe modératrice du débat, reprit Grisella, en posant d'abord une question piège : Si " être " signifie l'existence d'une réalité intrinsèque, indépendante de son observation par l'homme, l'homme peut-il vraiment accéder à ce qui " est " puisqu'il ne peut le faire qu'en observant ?

- Grisella, tu donnes trop dans la philosophie, ce soir, intervint Kirgard, et tu fais un peu trop facilement fi de la science, qui est, comme la caricaturait Paul Valéry « un ensemble de recettes qui marchent toujours ». Si ces recettes marchent toujours, indépendamment des expérimentateurs et où qu'ils soient dans le monde, cette infaillibilité doit bien avoir une cause, qui est l'existence d'une réalité indépendante, structurée, dont la structure a précisément pour conséquence que la recette doit réussir¹⁷ et à laquelle on accède pourtant seulement indirectement par ces expériences.

- Trêve de philosophie, Puisque c'est Robin lui-même qui lance le sujet, dit Noël, allons-y avec courage car aujourd'hui on n'a parlé que du temps et de l'espace qui sont plutôt des concepts d'encadrement de ce qui "existe", même s'ils interfèrent entre eux, et même si la matière interfère avec eux, ce ne sont que des concepts d'encadrement qui ne paraissent pas avoir d'existence propre, alors que la matière est tout de même un peu à part, comme le ressent Robin, c'est vraiment le corps du délit de notre enquête quand l'espace et le temps ne sont que les circonstances.

Couchés dans l'herbe comme nous le sommes est la position idéale pour rester au ras des pâquerettes comme le souhaite Robin et parler de ce troisième comparse du gang temps-espace-matière que vous traquez, en ne nous laissant pas paralyser par les "superhypergigantesques" quantités de cette matière dans l'univers, ni par l'extravagante diversité de cette matière.

- Une considération réconfortante pour ne pas rester tétanisé face à cette extravagance, intervint Kirgard, est de te rappeler que depuis que l'on sait identifier à distance les diverses catégories de matière par la spectroscopie, on n'a trouvé nulle part ailleurs dans l'univers observable d'autre matière que celle que l'on connaît sur notre bonne Terre.

¹⁷ Bernard d'Espagnat *A la recherche du réel* p30 Gauthier-Villars 1991.

Toute la matière de l'univers rentre dans la bonne vieille classification de Mendéléiev, d'ailleurs avec une très large majorité des corps les plus simples comme l'hydrogène et l'hélium qui constituent à eux deux 98% de l'univers observable. Vous seriez tout de même beaucoup plus perplexes si ce qui existe ailleurs n'était que matières exotiques n'ayant aucun parent connu sur notre Terre !

- D'accord !, mais sans quitter notre terre, il suffit d'observer la "superhypergigantesque" diversité et complexité de la matière dite vivante pour être émerveillé par le spectacle et sa beauté, mais découragé face à toute tentative de compréhension, maintint Noël.

- Sauf, coupa Grisella, que le vertige de la biodiversité peut tout de même se laisser approcher en considérant que tout être vivant est fait de matière, toute matière est faite d'atomes, tous les atomes sont faits de protons, de neutrons et d'électrons en arrangements divers ; ce n'est que l'arrangement qui crée la complexité, et aussi la beauté si tu y tiens, pas les composants qui restent toujours des quarks et des électrons.

La compréhension de ton extravagante diversité de matière a tout de même largement progressé depuis que les hommes se demandent de quoi est fait ce monde en tentant sans jamais désespérer des opérations de réductionnisme sur sa complexité. Si je me souviens bien des premières enquêtes menées dans la Grèce antique, l'inspecteur Thalès alla droit au but du réductionnisme maximaliste en considérant que l'eau était le seul élément de base, probablement parce qu'il avait noté que l'eau permettait le développement de la vie, et il pensait que cet élément unique pouvait se déguiser en tous les autres puisque l'herbe et les fleurs poussent après la pluie.

L'inspecteur Anaximandre a pris en compte un peu plus subtilement que la création résulte souvent de l'assemblage de deux contraires ou complémentaires, le sol sec recevant l'humidité de l'eau, la brebis recevant le bélier, cela rejoint un peu le Yin et le Yang chinois ; il n'était pas d'accord avec Thalès pour accepter l'idée d'un seul élément de base, il fallait des contraires, et il imagina une espèce de vide fertile, créateur de diversité d'où pouvaient sortir des contraires, qu'il nomma *Apeiron*.

- Ça, c'est une idée tout à fait moderne et géniale pour son époque¹⁸, coupa Kirgard, je vous dirai pourquoi quand vous voudrez, mais continue, Grisella.

- L'idée a eu du mal à faire son chemin, son collègue Anaximène fit marche arrière en reprenant l'idée de Thalès d'un élément de base unique, mais en remplaçant l'eau par l'air parce qu'il avait observé en soufflant sur un miroir que l'air se condensait en buée et qu'il devait donc être à la source de tout, y compris de l'eau. Bel exemple d'erreur d'intellectuel, car s'il avait essayé de faire pousser des salades en soufflant dessus, il aurait pu constater que ça ne marchait pas aussi bien qu'avec l'eau.

L'inspecteur Parménide, lui, pensait comme Robin que la matière était vraiment de l'"être" par essence, il croyait qu'on ne pouvait ni la créer, ni la transformer, ni la détruire ; il ne pouvait pas prévoir qu'au CERN à Genève on pourrait au vingtième siècle créer ou détruire de la matière en l'échangeant contre de l'énergie, mais s'il avait connu l'inspecteur Einstein et sa découverte : matière = énergie, et s'il avait mis tout cela dans sa définition de l'"être", il n'aurait pas été loin d'avoir raison.

Pourtant son idée sur l'impossibilité de transformation de la matière heurtait le sens commun puisqu'on peut voir les fleurs naître et mourir en donnant des fruits, alors Empédocle rajouta des paramètres en déclarant que tout était constitué de quatre sortes de matière : terre, air, feu et eau, et que leurs combinaisons étaient animées par deux forces : l'amour et la haine ; les objets naissaient de la combinaison de ces éléments, et disparaissaient par leur séparation. C'était déjà un peu de la physique atomique à l'échelle macroscopique.

¹⁸ Léon Lederman, *Une sacrée particule*. Editions Odile Jacob 1996

L'inspecteur Anaxagore introduisit l'idée d'un "esprit" qui aurait déjà eu en tête le modèle de l'objet final et contrôlerait tous ces multiples et merveilleux assemblages, et il introduisit aussi la notion de petits éléments du jeu de "Légo" qui pouvaient être assemblés pour réaliser l'objet, idée reprise par ce cher commissaire Démocrite, qui semble se l'être appropriée et passe ainsi pour le saint patron des physiciens modernes en ayant officialisé cette idée d'a-tomes insécables dont tous les corps seraient constitués comme un grand jeu de Légo.

Il ne savait pas trop des atomes de quoi, mais ils apportaient certaines propriétés : pour lui, les liquides avaient des atomes arrondis roulant les uns sur les autres, les piments des atomes pointus et piquants, le sucre des atomes lisses et doux, le fer des atomes durs et bien emmêlés, etc., et des mélanges adéquats de tous ces atomes munis de petits crochets pour se grouper ensemble formaient tout ce qui existe. Le commissaire Démocrite alla même jusqu'à émettre l'idée que l'âme elle-même était constituée d'atomes particuliers, tout fins et unis.

Le réductionnisme de la diversité avait donc progressé assez vite par la réflexion de tous ces grecs, et deux conceptions philosophiques globales dominèrent ensuite le panorama de la philosophie : celle de l'inspecteur Platon qui, un peu poète insatisfait comme Noël, considérait que derrière le monde sensible préexistait une Réalité plus profonde qui était le monde des Idées, et celle d'Aristote, réaliste à tous crins comme Robin, qui au contraire pensait que rien n'est dans la conscience qui n'existe d'abord dans les sens ; les "idées" n'apparaissent qu'à la suite de l'observation du monde par nos sens.

Ces deux attitudes sont encore actuelles et si Platon avait participé à notre discussion de ce matin sur l'espace et le temps, il aurait certainement prétendu que ces deux "idées" d'espace et de temps préexistaient au monde, alors qu'Aristote aurait défendu que ce sont les phénomènes du monde sensible qui amènent à créer ces notions pour les décrire.

- En plus d'être husserlien, c'est vrai que je me découvre finalement nettement plus aristotélicien que platonicien, dit Robin.

- Ça, on l'avait déjà remarqué, trancha Grisella. Finalement, je crois qu'Aristote a été le premier philosophe existentialiste puisqu'il avait pensé bien avant Sartre que le fait d'exister précède les discours que l'on peut faire sur l'existence : l'existence précède l'essence.

4

Le couteau de Démocrite pourra-t-il encore

trancher ?

Le professeur Kirgard intervint pour limiter ces ébats philosophiques :

- Tu te laisses dériver vers la philo au lieu de rester sur la trace de la matière, Grisella ! je te propose de reprendre la piste et de sauter tout de suite au 19^{ème} siècle, car il ne s'est pas passé grand chose de fondamental entre temps dans ce domaine, et d'en venir à Mendéléiev, ce Russe inspiré qui a intelligemment classé les corps simples en se basant sur des propriétés chimiques voisines, qui laissaient entrevoir des ressemblances de structure dans ces fameux atomes, dont on sait maintenant qu'ils n'étaient pas les a-tomes insécables dont rêvait Démocrite puisqu'on a pu ensuite les découper en morceaux plus fins.
- On n'a pas encore pu arrêter le couteau de Démocrite, reprit Grisella, quand on a disséqué la centaine d'atomes de Mendéléiev en protons, neutrons et électrons, on croyait être enfin au bout du réductionnisme avec seulement ces trois a-tomes au lieu d'une bonne centaine. C'était une découverte encore plus merveilleuse que l'invention de l'alphabet puisqu'on pouvait alors décrire toutes les merveilles du monde, l'eau de Thalès, l'air d'Anaximène, les brebis, les fleurs, la terre, la lune et les étoiles avec seulement trois lettres : le proton, le neutron et l'électron, assemblés ensuite en atomes, en molécules, macromolécules et cellules, comme on a pu écrire tous les livres de toutes les bibliothèques avec seulement 26 lettres assemblées en mots, en phrases, en paragraphes et en chapitres.
- Tu as eu raison, Grisella, de parler à l'imparfait parce le couteau de Démocrite nous a ensuite réservé d'autres surprises en désossant les protons et neutrons en quarks, et en découvrant d'autres petits os fins cachés dans la chair de la matière, comme les appelle Léon Lederman¹⁹ : des neutrinos, des muons, des taus, de sorte que notre alphabet matière de trois lettres de la première moitié du siècle dernier s'est ensuite agrandi à plusieurs dizaines, avec une description de ces "lettres" d'ailleurs beaucoup moins simple que celle des petites billes puisque l'idée mécaniste de constituants fondamentaux de la matière décrits en termes d'espace n'est plus guère soutenable et que les "particules" sont plutôt perçues comme des "processus".

¹⁹ Léon Lederman *Une sacrée particule* Odile Jacob 1996.

- Vous n'allez pas un peu vite en besogne, professeur ? dit Robin : et les quarks, et les leptons ? , je croyais qu'ils étaient les dernières briques fondamentales à la mode, les "vrais" a-tomes du jour.

- Affirmatif ! , mais on ne peut plus décrire une "particule" sans y associer son "interaction" avec le reste du monde : c'est cela que j'appelle un processus. Le processus temporel de l'atome prime sa description spatiale ; en d'autres termes, l'atome est ce qu'il est parce qu'il fait ce qu'il fait.

- On ne pourrait pas revenir à des notions plus claires ? osa timidement Grisella, soyez plus didactiques, messieurs, et reprenez donc à partir des protons, neutrons et électrons.

- Alors simplifions un peu et ne considérons d'abord que la matière actuelle, celle qui existe dans notre univers déjà bien refroidi, la matière que nous côtoyons tous les jours, et en laissant de côté pour le moment les formes qu'elle a pu connaître à des températures beaucoup plus élevées dans un passé lointain proche du Big-Bang.

Une vision simplifiée mais didactique comme le réclame Grisella est de nous replacer à cette belle époque des trois lettres permettant d'écrire notre matière de tous les jours : le proton, le neutron et l'électron. Effectivement, toute la matière figurant dans la table de Mendéléiev n'est faite que d'assemblages plus ou moins divers de ces trois particules en faisant varier le nombre de protons et de neutrons agglutinés ensemble dans le noyau par la "force forte", et en organisant autour de ce noyau une ronde un peu floue d'électrons en nombre égal à celui des protons, et satellisés par la force électromagnétique.

Je ne vous apprendrai rien en vous rappelant cette image simpliste où l'atome était vu comme un système planétaire avec le noyau comme soleil et les électrons comme planètes tournant sur des orbites stables, la force centrifuge qui tend à les éloigner de leur soleil étant équilibrée par la force d'attraction électrostatique entre le noyau chargé positivement et les électrons chargés négativement.

Il faut d'abord prendre conscience que la matière est presque vide, les atomes qui la constituent sont des espèces de bulles.

Si vous grossissez par la pensée un atome aux dimensions de la place de l'étoile à Paris, vous n'y voyez d'abord qu'une place vide. En cherchant bien au centre, à la place de l'arc de triomphe, vous apercevez une espèce de petit grain de riz, c'est le noyau fait de protons et de neutrons, dont la taille réelle est de l'ordre de $2,8 \cdot 10^{-13}$ cm, et en parcourant la périphérie de la place, au lieu d'y trouver la ronde des voitures, vous apercevez une sorte de brouillard d'électrons, 2000 fois plus petits que le grain de riz du centre de la place, qui tournent à la vitesse affolante de 1000 kilomètres par seconde autour du noyau. Tout le reste est vide.

Cette incroyable vacuité de la matière actuelle vous permet d'imaginer que la densité de matière ait pu être des millions de fois plus forte dans un passé lointain, proche du Big-Bang, où la matière était infiniment plus condensée, comme elle l'est encore aujourd'hui dans les trous noirs qui ne sont pas des trous, mais de la matière compactée.

Donc même les silex du chemin qui nous paraissent si durs ne sont que des éponges quasi vides, et si on ne peut pas les presser, c'est parce qu'il existe entre les noyaux d'atomes et les électrons périphériques un équilibre de forces qui maintient la distance, de même qu'entre les électrons périphériques des atomes voisins, des forces de répulsion ne permettent pas de les écraser. Par contre, ces électrons périphériques peuvent changer de propriétaire en sautant d'un noyau à un autre de nature différente, cela s'appelle la chimie. Les atomes ne sont donc pas figés, mais sensibles aux rencontres qu'ils peuvent faire ; ils peuvent évoluer vers des molécules de plus en plus complexes et vers la vie. La diversité du monde est une conséquence de la faiblesse relative de l'attraction électrique entre l'électron et le proton.

A l'inverse de cette douce force électromagnétique, l'espèce de glu nommée "force forte" maintient les protons et les neutrons du noyau dans une cohésion 100 fois plus intense

malgré la force de répulsion électrique qui s'exerce entre protons qui ont des charges électriques de même signe. Si le monde n'était géré que par cette énorme force nucléaire, ce serait un monde figé sans évolution possible, contrairement au monde divers et évolutif de la force électromagnétique. Heureusement pour notre existence, cette "force forte" a une portée très courte, ne dépassant pas 10^{-13} centimètre et disparaît donc pratiquement au-delà du noyau, sinon tout l'univers se serait déjà coagulé sur lui-même.

Cette énorme force de cohésion du noyau des atomes explique pourquoi les alchimistes n'ont jamais réussi à transmuter les éléments, car les énergies (ou températures) à mettre en œuvre étaient très au-delà de leurs moyens.

Il faut une énergie énorme pour vaincre cette cohésion nucléaire. On exprime généralement cette énergie en électron-volt (e.V)¹. On peut aussi l'exprimer en température, qui est une image de la vitesse moyenne des particules et donc de leur énergie cinétique : $E = k.T$. Un électronvolt correspond à 10.000 degrés, c'est l'énergie cinétique qu'acquiert une particule portée à 10.000 degrés.

Il faut des énergies de plusieurs millions d'électronvolts, ce qui correspond à 10 milliards de degrés, pour vaincre cette force de cohésion du noyau, alors qu'il suffit d'une dizaine d'électronvolts pour extraire un électron d'un atome d'hydrogène. C'est seulement dans les atomes très lourds, au delà de l'uranium avec ses 92 protons que cette force forte ne parvient plus à contrecarrer la force électrique de répulsion exercée sur un proton par la centaine de ses voisins encombrés aussi de neutrons, et ne maîtrise plus aussi bien la cohésion du noyau qui laisse échapper spontanément, ou sous le choc d'un neutron, quelques-uns de ses composants, cela s'appelle la fission nucléaire et la radioactivité.

Voilà pour la vision rustique de l'atome à travers les protons, neutrons et électrons. Venons en aux quarks et leptons que Robin évoquait comme nouvelles briques de l'univers. C'est le couteau de Démocrite qui continue toujours ses ravages en essayant de désosser les morceaux les plus gros de l'atome, c'est-à-dire les deux nucléons proton et neutron, qui ont une dimension mesurable puisqu'elle est de l'ordre de $2,8 \cdot 10^{-13}$ cm qui était la limite de la résolution possible des mesures vers le milieu du vingtième siècle, alors qu'actuellement on va au delà de 10^{-16} cm, mais cette fois ci, le couteau n'était pas assez pointu pour percer la peau de ces nucléons ; pourtant cette peau est translucide et laisse apercevoir qu'il y a quelque chose à l'intérieur qui bouge très vite, trois petites choses dans un proton, trois petites choses dans un neutron, mais on ne peut pas les en sortir. C'est Gell-Mann²⁰ qui les entrevit en 1964 et s'amusa à les affubler de ce nom de quarks qu'il avait trouvé dans une nouvelle de James Joyce : *Finnegans Wake*.

En réalité il n'y a pas de peau et ce n'est qu'une image, mais tout est image en physique ; le proton est formé de trois quarks sans peau et le neutron est formé aussi de trois quarks, mais la force qui lie entre eux ces quarks est comme une espèce de colle souple qui autorise les micromouvements, et les quarks semblent jouir d'une certaine liberté à l'intérieur du proton et du neutron, mais au-delà de cette très petite distance de liberté à l'intérieur de cette "peau" qui semble les enfermer, la force d'extraction qu'il faudrait développer pour les en sortir semble devenir infinie, c'est pourquoi ils semblent enfermés dans une peau impénétrable. Les quarks d'un nucléon sont comme trois chèvres attachées au même piquet par trois chaînes d'acier, elles peuvent tourner autour du piquet et s'en rapprocher, mais aucune ne peut s'échapper dans la montagne pour se faire manger par le loup, on n'a encore jamais vu un quark en liberté.

N'en concluez pas que le proton et le neutron sont identiques parce qu'ils sont tous deux formés de trois quarks, car les quarks présentent des "aspects" différents, comme il y a des chèvres blanches et des chèvres brunes qui sont toutes des chèvres.

Les physiciens ont classé ces aspects qu'ils appellent des "saveurs" et leur ont donné des noms de code comme up (*u*) et down (*d*) ; ils leur ont aussi attribué des "couleurs", qui n'ont bien sûr rien à voir avec les couleurs réelles, mais sont des attributs métaphoriques permettant de décrire un comportement plus simplement que sous forme mathématique. Ce qualificatif est bien choisi car ces "couleurs" sont au nombre de trois, comme les trois couleurs fondamentales de la palette, et une loi de l'assemblage des quarks dans une particule complexe est que cet assemblage doit être "blanc", c'est à dire soit composé de trois quarks de trois couleurs différentes, de la même manière que la superposition des trois couleurs fondamentales donne du blanc, ou alors constitué d'un quark et d'un antiquark de même couleur, ce qui détruit la couleur.

¹ Un Electron-Volt est l'énergie cinétique d'un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 volt

²⁰ Murray Gell-Mann, *Le quark et le jaguar*. Champs flammariion 1997

Presque toute la matière de l'univers est seulement composée des deux quarks u et d et de l'électron. Le proton étant constitué de trois quarks uud et le neutron de trois quarks udd . Comment cela s'accorde-t-il avec la charge électrique positive du proton et la charge nulle du neutron ? Là vient une idée tordue qui consiste à considérer qu'un "aspect" du quark up est d'avoir une charge de $+2/3$ et un "aspect" du quark $down$ d'avoir une charge de $-1/3$. C'était une idée vraiment tordue parce dans la nature, les charges libres sont toutes des multiples entiers $0, 1, 2, \dots$, positifs ou négatifs, de la charge de l'électron prise comme unité ; le proton a très exactement une charge électrique égale à $+1$, mais en fait cette constatation n'est pas enfreinte par les quarks puisqu'il n'existe pas de quarks libres dans la nature, et cette idée incongrue de charges multiples de $1/3$ marche, et vous pouvez constater que le proton uud a bien une charge de $+2/3+2/3-1/3 = 1$, et le neutron udd une charge de $+2/3-1/3-1/3 = 0$

- Apparemment, cela n'a pas fait beaucoup avancer notre affaire, grogna Robin, car on est passé d'une description à trois composants : proton, neutron, électron, à une autre description à trois composants : quark u , quark d , et électron.

- A première vue, tu sembles avoir raison, Robin, mais en y regardant de plus près, c'est pourtant un progrès sous plusieurs angles :

- D'abord, il était déplaisant d'attribuer le qualificatif de particule élémentaire à des particules qui ont une dimension mesurable et mesurée, car cela laisse l'arrière-pensée qu'elles peuvent être sécables ; or nous venons de dire que le proton et le neutron ont des dimensions mesurables, de l'ordre de 10^{-13} cm, à la différence de l'électron qui, lui, semble mieux mériter ce qualificatif car sa dimension est un peu en deçà de la limite inférieure actuelle du mesurable (de l'ordre de 10^{-16} cm), dans la zone des 10^{-18} cm, et peut jusqu'alors être considéré comme un point géométrique, en appelant point ce qui est en dessous de cette limite. Les quarks, eux, répondent aussi bien que l'électron à ce qualificatif de ponctuel.
- Ensuite, et c'est le plus important, parce que nous n'avons raisonné jusqu'alors que sur la matière existant aujourd'hui dans notre monde refroidi, mais il existe d'autres formes de matière que les physiciens savent maintenant recréer artificiellement pendant des temps très courts en provoquant des collisions à haute énergie entre des particules dans les grands accélérateurs-collisionneurs des centres de recherche comme le CERN en Europe ou le Fermilab aux Etats Unis. Toutes ces matières créées à grands coups d'énergie sont des échantillons de la matière primitive de l'univers, ayant existé aux températures diaboliques qui régnaient à l'époque. Or elles se présentent toutes comme des assemblages de quarks et de leptons, ce n'est tout de même pas un mince avantage !

C'est comme cela que nous en sommes arrivés à une peinture complète de la matière ayant existé au cours de l'histoire de l'univers au moyen du modèle dit "standard", qui dépeint toute matière actuelle ou passée au moyen d'une palette de 6 quarks et 6 leptons.

Et il y a aussi bien entendu les antiparticules correspondantes, c'est à dire les antiquarks et les antileptons, comme il y avait les antiprotons et les antiélectrons, nommés positons (ou positrons) de notre matière actuelle. Tous ces quarks, antiquarks, leptons et antileptons, joints aux particules d'interaction que sont les bosons, constitue ce qu'on appelle le "modèle standard", qualificatif très modeste pour désigner la palette complète du peintre de l'univers actuel et passé.

- Moi, je trouve normal d'utiliser un qualificatif aussi modeste que « modèle standard », intervint Noël, car ce n'est effectivement que la palette du peintre, et une palette n'a jamais été une œuvre d'art, ce qui m'intéresse, c'est plutôt ce peintre anonyme dont on admire l'œuvre, pas sa palette, mais passons, et expliquez-nous plus clairement ce qui différencie la matière actuelle de la matière "préhistorique", mais avant de le faire, il y a une autre question qui mériterait aussi une révision préalable, c'est ce neutrino qui est aussi une particule de notre matière actuelle et qui nous est moins familier que le proton, le neutron et l'électron.

- C'est normal qu'il vous soit moins familier, sa découverte est plus récente et son rôle plus subtil, son existence avait été prédite par Pauli vers 1920, mais n'a été vérifiée expérimentalement que 35 ans plus tard vers 1955 par Reiners, ce qui ne lui a

valu un prix Nobel que 40 ans plus tard en 1995, car on a mis bien longtemps à discerner l'importance des propriétés de cette particule subtile qui n'est presque rien : elle n'a pas de charge électrique, d'où son nom, apparemment pas de dimension ni de masse, ou peut-être une masse extrêmement faible, elle n'est sensible ni à la force d'attraction électrique des électrons puisqu'elle est neutre, ni à la "force forte" d'attraction des noyaux des atomes et n'exerce donc aucune interaction avec notre matière faite de protons, de neutrons et d'électrons, de sorte qu'elle traverse librement sans se manifester toute matière, et ceci à la vitesse de la lumière.

Actuellement ma main est traversée par des milliards de neutrinos ; souvenez-vous de ce que nous avons dit tout à l'heure sur le grand vide des atomes avec leur minuscule noyau et leurs électrons si lointains, eh bien les neutrinos passent à travers ce vide et votre corps n'en ressent aucun effet. Les neutrinos traversent même toute notre terre aussi facilement qu'une feuille de papier.

- D'où sortent-ils ?

- Ils viennent des étoiles, engendrés par les réactions nucléaires qui s'y développent et ils en extraient de l'énergie.

En février 1987, une supernova explosa. Elle n'était visible que depuis l'hémisphère sud, mais les laboratoires de l'hémisphère nord ont pourtant été aussi vite informés de cette explosion par une énorme pluie de neutrinos qui avaient traversé toute l'épaisseur de la terre pour apporter la nouvelle. L'explosion avait eu lieu 150.000 ans plus tôt, et les messagers voyageant à la vitesse de la lumière sont arrivés en même temps dans l'hémisphère sud sous forme de photons visibles par l'œil, et dans l'hémisphère nord sous forme de neutrinos qui ne se laissent arrêter par rien, et qui sont seulement détectables par des moyens très spéciaux.

En une semaine, cette étoile explosant en supernova a émis sous forme de neutrinos plus d'énergie que tous les photons lumineux de 100 millions de galaxies, et en quelques mois autant d'énergie que notre soleil dans toute sa vie passée et future de 10 milliards d'années.

D'autres neutrinos proviennent en droite ligne du Big-Bang, ou plutôt une seconde après le Big-Bang, alors que la température de l'univers était supérieure à dix milliards de degrés, les neutrinos foisonnaient à côté des autres particules et cette boule de feu était opaque aussi bien aux neutrinos qu'aux photons, mais lorsque la température tomba en dessous de dix milliards de degrés, le monde passa de l'opacité à la transparence pour les neutrinos, comme il le fera plus tard pour les photons à trois mille degrés. Cet énorme rayonnement de neutrinos circule encore parmi nous, mais leur énergie initiale qui était de un million d'électron-volt n'est plus que d'environ un millième d'électron-volt, ce qui n'a pas encore permis leur identification. Pourtant soyez certains que ces neutrinos sont encore partout, il y en a plus de 400 par centimètre cube dans l'espace qui nous entoure et il y a beaucoup de ces ancêtres parmi les milliards de neutrinos qui traversent ma main en ce moment.

- Ils traversent tout, ils n'agissent sur rien, et vous dites qu'ils extraient de l'énergie des étoiles, ce n'est pas évident à comprendre, gémit Robin.

- C'est vrai ! , c'est aussi pour cela qu'ils sont restés méconnus si longtemps, mais c'est justement par ce côté énergie que Pauli émit l'hypothèse de leur existence en constatant que dans la désintégration du neutron on ne retrouvait pas toute la masse, donc pas toute l'énergie.

Une minute sur le neutron si vous voulez bien : vous savez que c'est le compagnon habituel du proton dans le noyau des atomes, qu'il est électriquement neutre comme son nom l'indique, eh bien ! ces neutrons qui sont stables lorsqu'ils sont associés aux protons dans les noyaux sont instables lorsqu'ils sont isolés : si vous réussissez à isoler un neutron vous pourrez difficilement le maintenir en vie plus de 11 minutes au bout desquelles il a une chance sur deux de se désintégrer en se transformant en proton et en émettant un électron, ce qui préserve la neutralité électrique globale, mais en émettant aussi un neutrino, ou plus exactement un antineutrino, ce qui aurait pu passer inaperçu si de très fines mesures de masses n'avaient pas mis en évidence que la masse du proton est un peu plus faible que celle du neutron et qu'une partie de la masse avait donc disparu dans la désintégration. Comme vous savez que la masse, c'est de l'énergie, vous concluez que cette partie de masse manquante représente l'énergie évacuée par le neutrino.

Cette réaction nucléaire typique fait partie de celles qui se produisent dans les étoiles et voilà donc comment ces neutrinos extraient l'énergie des étoiles et les refroidissent. Ce type de réaction est conforme à la tendance générale de la nature, qui est de faire évoluer les structures disposant d'un excès d'énergie vers des états d'énergies plus bas qui les mènent à des structures plus stables. Ceci vous explique en passant pourquoi ces neutrons qui se désintègrent si facilement lorsqu'ils sont seuls sont parfaitement stables quand ils sont associés aux protons dans les noyaux d'atomes : c'est parce que le neutron lié n'y dispose plus de toute son énergie de masse, une partie étant investie dans l'énergie de liaison avec le proton.

Revenons aux neutrinos qui transportent de l'énergie et interfèrent pourtant si peu avec la matière ; la raison en est qu'ils ne sont sensibles qu'à une seule interaction : l'interaction faible, que je n'ai fait que rappeler au début de nos discussions comme une des quatre forces recensées dans la nature, force de portée encore plus courte que la force "forte" nucléaire, ce qui réduit donc d'autant la probabilité d'interaction.

Notez que les neutrinos et les électrons ont des parentés de caractéristiques et de comportement dans certaines interactions, qui ont conduit à les étiqueter sous un label commun de "leptons", dont on pourrait dire qu'ils constituent deux saveurs, comme les quarks *d* et *u* sont deux saveurs d'une même entité "quark".

Je reviens maintenant à la question principale de Noël : qu'est ce qui différencie la matière actuelle de la matière du lointain passé ? L'univers se refroidit, par la dilution d'énergie créée par l'expansion ; on peut donc penser que la matière ancienne était beaucoup plus riche en énergie qu'actuellement, et donc beaucoup plus dense, puisque la masse n'est finalement que l'énergie qu'il faut investir pour créer des particules de matière.

- Aïe ! sursauta Grisella, nous voilà avec une troisième définition de la masse, on avait déjà la masse inertielle comme image de la résistance au mouvement, la masse attractive comme image de la force de gravitation exercée sur un corps, et voilà la masse comme image d'un investissement d'énergie.

- Bien sûr, Grisella, et aussi comme image de l'énergie que l'on peut théoriquement récupérer en détruisant cette masse pour y trouver le retour de cet investissement qui n'a pas été fait par l'homme, c'est ce que EDF fait tous les jours dans les centrales nucléaires.

Mais par parenthèse, ne soyons pas trop lyriques sur cette récupération de l'énergie de masse : Les réacteurs nucléaires actuels utilisant la fission n'en récupèrent que 0,1 % ; dans les éventuels futurs réacteurs à fusion ce ne sera encore que 0,5 %, mais tout cela est déjà mieux que la combustion du pétrole ou du charbon où on récupère seulement un milliardième de l'énergie de masse (et on pollue de plus l'atmosphère en y injectant du CO₂ qui perturbe dangereusement le climat sur le long terme). L'idéal serait de savoir contrôler la réaction matière-antimatière, car dans l'annihilation des deux, on détruit totalement la masse et on récupère donc la totalité de l'énergie de masse, mais on ne voit cela dans la nature qu'au bord des trous noirs, alors revenons à nos moutons.

Donc l'énergie investie dans la matière a dû être beaucoup plus élevée aux débuts de l'univers, et comme l'homme sait maintenant créer de la matière exotique à partir d'énergie en faisant cogner l'une contre l'autre des particules de matière existante, il s'amuse depuis quelques décennies à ce petit jeu avec des énergies de plus en plus élevées pour essayer de découvrir les types de particules plus énergétiques qui existaient à ces époques de l'enfance du monde, et ainsi remonter le temps.

Ainsi, si on repart de notre matière actuelle qui n'est faite que de 4 particules fondamentales : le quark *u*, le quark *d*, l'électron et le neutrino, on constate que ce sont toutes des particules de faible énergie qui n'ont pas coûté bien cher en investissement. Le neutrino est le plus minable avec moins de 7 e.V ; pour l'électron, avec sa masse de 10^{-27} gramme, il en faut déjà 500.000, pour le quark *u* 5 millions (5 MeV) et pour le quark *d* 8 millions (8 MeV).

Ne vous laissez pas trop impressionner par ces chiffres qui semblent élevés parce ce sont des énergies appliquées à une seule particule, car ils restent bien faibles par rapport aux énergies que nous appliquons quotidiennement à nos objets macroscopiques. Craquer une allumette met en jeu une énergie de l'ordre du téraélectron-volt, du même ordre de grandeur que celle du plus puissant accélérateur de particules en cours de construction, mais cette énergie s'applique à des milliards de milliards d'atomes. Une ampoule électrique de 100 Watts consomme 625 trillions d'électron-Volts par seconde. Si vous voulez une autre image en unités de masse, souvenez-vous que 1 MeV n'équivaut qu'à $1,8 \cdot 10^{-27}$ gramme.

Cette première famille des 4 particules actuelles, comprenant deux quarks (*u* et *d*) et deux leptons (l'électron et le neutrino) est nommée la famille électronique, c'était la seule connue jusqu'en 1972.

En utilisant des énergies plus élevées, les physiciens ont progressivement mis à jour de 1972 à 1976 les membres d'une seconde famille, la famille muonique, où le lepton correspondant à l'électron est le muon, environ 100 fois plus lourd que l'électron et exigeant 105 MeV pour sa création. Les autres membres de cette famille sont deux quarks d'autres saveurs : le quark "étrange" *s*, comme strange en anglais, et le quark "charmé" *c*, comme charme²¹, dont les énergies de création sont respectivement de 175 MeV et 1270 MeV. Le quatrième membre de la famille est parallèlement un neutrino, le neutrino muonique dont l'énergie reste modeste avec 0,27 MeV.

Toujours plus haut, dans la chaleur intense des collisions produites dans les grands accélérateurs, les physiciens ont terminé en 1995 le dénombrement d'une troisième famille, toujours constituée de deux quarks et de deux leptons : les deux quarks sont le "beau" quark *b*, comme beauty (ou bottom selon les goûts), qui "pèse" environ 5 giga électronvolts (GeV), et le tout dernier quark *t* comme "top" qui a exigé l'énergie énorme de 174 GeV. Le lepton

²¹ Sheldon L. Glashow, *Le charme de la physique* Albin Michel 1997

correspondant à l'électron est le tauon, qui est environ 3000 fois plus lourd que l'électron et demande 1784 MeV, et le lepton correspondant au neutrino est le tau neutrino "pesant" un peu moins de 36 MeV.

Les membres de ces deux dernières familles sont des produits de laboratoires, ils n'existent plus dans la nature sauf quelques-uns d'entre eux comme le muon, qui sont produits en haute atmosphère par des rayons cosmiques très puissants, résidus d'explosion de supernovae, mais toutes ces familles, qu'il serait plus correct d'appeler générations puisqu'elles se sont succédées au cours du refroidissement de l'univers, coexistaient aux époques primitives. L'énergie des particules des tout premiers temps devait se compter en milliards de milliards de téra électron.volts, totalement hors d'atteinte des moyens de l'homme qui ne pourra donc jamais reconstituer le temps zéro.

- Oui ! mais au-delà de ces trois familles si récemment identifiées, hasarda Robin, il y en aura sûrement une quatrième, une cinquième et d'autres, que l'on découvrira bientôt avec des accélérateurs encore plus puissants.

- ...Il semble que non, répondit Kirgard au bout d'un silence hésitant ; je sais bien qu'il est imprudent d'essayer de prédire les exploits futurs du couteau de Démocrite car lorsqu'on se retourne en arrière, on constate les pas gigantesques qu'a fait la compréhension de l'univers en moins d'un demi-siècle, mais si j'écoute ce que disent les physiciens, ils pensent que pour plusieurs raisons, il ne peut exister que ces trois familles.

Certaines de ces raisons sont d'ordre cosmologique, basées sur la répartition de l'hydrogène et de l'hélium dans l'univers, les autres d'ordre intra-atomique, basées sur la largeur de masse du boson Z_0 , sans en dire davantage. Certains physiciens parlent encore de découvrir des choses plus fines sous les quarks et même sous les leptons : des préons ?, sans oublier bien sûr la représentation de toutes les particules par les supercordes, mais personne ne parle aujourd'hui de quatrième famille.

Grisella, dont la tête émergeait de la fermeture éclair de sa tente, riait discrètement.

- Tu trouves ça comique, questionna Noël surpris ?

- Je ris parce que je repense aux paroles de Robin au début de cette veillée, où il disait en gros : revenons de nos discussions vertigineuses sur l'espace et le temps qui ne sont que les cadres intellectuels des phénomènes, et parlons de la matière, ça au moins c'est de l'"être" solide et permanent, avec des indices palpables pour notre enquête. Après cette révision des idées actuelles sur la matière, j'ai plutôt le sentiment que le couteau de Démocrite est allé si loin que la notion rassurante de substance solide et permanente, qui sous-tendait l'idée de matière jusqu'au niveau de l'atome qui était un petit morceau éternel de matière, s'efface dans l'intra-atomique au profit d'interactions tourbillonnantes d'un nombre restreint d'"êtres" plus mathématiques que réels, dans un espace quasi vide, et j'avoue que cela me paraît largement aussi vertigineux que les considérations précédentes sur le temps et l'espace.

- Je crois même, ajouta Kirgard, que Robin a dit un peu hâtivement qu'il déniait la qualité d'"être" à la lumière qu'il qualifiait un peu péjorativement d'"apparence", alors que la matière recevait de lui le label de véritable "être" par essence, solide et permanent. Ce sont des classifications hasardeuses car si vous envoyez une lumière suffisamment énergétique, vous voyez ses photons de fréquence élevée se transformer sous vos yeux en paires d'électrons-positons, c'est-à-dire en matière. Donc ces catégories ne sont finalement pas si éloignées l'une de l'autre, la lumière peut se transformer en matière et réciproquement.

- En somme, c'est un peu comme si on essayait de mener une enquête de police dans un bal masqué vénitien sans avoir le droit de démasquer les participants, dit Grisella.

- Tout cela est un peu vertigineux, mais qu'y peut-on?, reprit Kirgard, il est vrai que l'on n'aperçoit plus très clairement ce qu'est la matière, qui semble se dissoudre dans ces notions de quarks avec leurs couleurs et leurs saveurs, qui sont surtout des outils de calcul permettant de décrire plus complètement les comportements des protons, neutrons et électrons, mais de même que pour le vertige de montagne, il faut tout simplement s'y accoutumer car comme en montagne, plus on monte, plus le vertige vous guette.

Nous sommes pourtant encore loin de la fin de notre collecte d'indices dans cette enquête sur la matière et son comportement. Lorsqu'on entre dans le monde subatomique, on s'aperçoit que la mécanique quantique vous donne des malaises comme le mal des

montagnes, que les relations d'incertitude de Heisenberg induisent des aspects tout à fait inattendus sur les durées de vie des particules réelles et sur le rôle de ces espèces d'anges du vide que sont les particules virtuelles, et que si on se demande ce qu'est une force, on ne sait plus trop de quoi on parle avec le nouvel éclairage des bosons. Si vous aimez vraiment côtoyer le vide dans cette enquête pleine de gouffres où le sol se dérobe sous nos pas, nous pourrions continuer demain à circuler parmi ces étranges aspects de la matière, car ce soir il me semble que l'on pourrait songer à rentrer dans nos tentes et nous réchauffer dans nos duvets en attendant le sommeil.

- Pas question ! il y a encore une foule de points obscurs pour moi, réagit Noël, et je serais plutôt d'avis de continuer pendant que la matière en question n'est pas trop refroidie.

- Oui ! acquiescèrent en cœur Grisella et Robin, il n'est pas si tard, et si cela vous dit, continua Grisella, il n'y a plus de café dans les thermos, mais je peux vous faire un café soluble pour compenser la fraîcheur du soir et réveiller ceux qui auraient sommeil.

- Va pour le café ! tu es une mère pour nous.

Pendant que Grisella s'affairait à faire chauffer l'eau, les deux garçons commencèrent à regrouper leurs idées afin d'en cerner les zones obscures.

L'eau chantait déjà dans la gamelle, et Grisella se joignit à leur concertation avant de distribuer les sachets de café et verser l'eau bouillante dans les gobelets, puis le silence se fit et pendant quelques minutes on n'entendit plus que les aspirations alternées du café brûlant sous le ciel étoilé.

- Bon ! résuma Robin, après discussion, on trouve tellement de questions à clarifier qu'on pourrait y passer la nuit, aussi on propose, peut-être un peu bêtement, de remettre à demain tout ce qui tourne autour de la théorie quantique bien que l'on sache qu'elle est indispensable pour aller plus avant, et de consolider seulement nos connaissances un peu éparées en répondant à trois questions que nous venons de recenser ; il y en a une de chacun de nous que je résume :

- Noël est un peu perplexe face aux diverses classifications des particules, car vous nous avez essentiellement parlé de quarks et de leptons en mettant l'accent sur un classement par ancienneté des particules, basé sur leur énergie, mais il y a aussi des classifications en hadrons, fermions, baryons, mésons, bosons, et il y a aussi le photon. Tout cela fait un peu botanique! Comment interfèrent toutes ces familles entre elles ? C'est la première question.
- Grisella voudrait mettre de l'ordre non plus dans les dénominations de particules, mais dans la liste de leurs attributs : il y a la masse, la charge électrique, le spin dont vous ne nous avez pas parlé, la durée de vie, l'énergie, la sensibilité aux quatre interactions connues, et peut-être d'autres. C'est la seconde question.
- La troisième question est celle que je me pose au sujet de ces bosons qui sont des particules, mais pas de la matière, seulement des agents d'information et d'action, mais ils ont pourtant des masses, je crois, et des vitesses diverses, et les forces, ce serait eux ? Cela échappe à mes sens. Et ces neutrinos qui filent à la vitesse de la lumière comme les photons ressemblent plutôt comme eux à des bosons, mais vous avez semblé les présenter comme de la matière, donc des fermions ! Bizarre, bizarre !

- Voilà un programme largement suffisant pour la fin de la soirée, dit Kirgard, mais si on commence par la première question de Noël, la réponse serait plus claire avec un bout de papier et un crayon, vous avez ça quelque part, car ma carte IGN est déjà gribouillée ?

Robin tendit le dos blanc de sa propre carte IGN et Kirgard commença à dresser un tableau en le commentant :

Le plus simple est de n'afficher que les particules élémentaires, en gardant en mémoire qu'à chacune d'elles correspond son antiparticule, et en les classant par famille. A partir de cette base, on peut accéder à toutes les autres particules et antiparticules par assemblage.

	CHARGE ELECTR.	1 ^{ère} FAMILLE (électronique)	2 ^{ème} FAMILLE (muonique)	3 ^{ème} FAMILLE (tauïque)
Leptons chargés	-1	e <i>électron</i>	μ <i>muon</i>	τ <i>taupon</i>
Leptons Neutres	0	ν_e	ν_μ	ν_τ
Quarks	2/3	u <i>up</i>	C <i>Charme</i>	t <i>top</i>
	-1/3	d <i>down</i>	S <i>étrange</i>	b <i>bottom</i>

La matière est constituée des leptons et des baryons ; les leptons, c'est la matière légère, les baryons c'est la matière lourde, faite d'assemblages de quarks.

Les leptons, vous les connaissez tous puisque nous venons de les répertorier dans les trois familles historiques, ce sont des particules qui paraissent vraiment élémentaires : l'électron et le neutrino de la famille électronique du monde actuel, le muon et le neutrino muonique, ainsi que le tauon et le neutrino tauïque.

Les baryons, eux, ne sont pas des particules vraiment élémentaires, ce sont des assemblages de trois quarks de trois "couleurs" différentes, c'est pourquoi j'ai préféré commencer par remonter aux particules considérées aujourd'hui comme vraiment élémentaires que sont les quarks et les leptons.

On trouve bien entendu dans ces baryons nos protons faits de trois quarks *uud* et nos neutrons faits de trois quarks *udd*, mais on y trouve aussi d'autres assemblages lourds et instables de trois quarks, nommés hypérons, qui sont donc des produits de laboratoire : les "lambda", faits de quarks *uds*, les "sigma", en trois sous-classes : les sigma électropositifs faits de quarks *uus*, les sigma neutres *dus* et les sigma électronégatifs *dss*, on y trouve les "xi" neutres *uss* et négatifs *dss* ainsi que les "oméga". La diversité de ces nouvelles formes de matière a laissé perplexes les expérimentateurs de la décennie 1970, avec la centaine de particules lourdes découvertes.

Il existe d'autres particules formées par des quarks, mais pas au nombre de trois : ce sont les mésons, constitués d'un quark et d'un antiquark de même couleur ; parmi eux, on trouve les mésons π , ou "pions" positifs *u anti d*, négatifs *d anti u*, neutres *u anti u+d anti d*, les "kaons" positifs *u anti s*, négatifs *s anti u*, neutres *d anti s*, et les "éta". Ces particules ne sont pas de la matière, ce sont des bosons composites, comme les baryons sont des fermions composites. Laissons-les de côté pour le moment.

Les baryons et les mésons sont groupés sous la dénomination de "hadrons", qui sont toutes les particules sensibles à l'interaction forte, puisque formées de quarks.

La catégorie "fermions" groupe les baryons et les leptons, à l'exclusion des mésons. C'est donc cela la matière.

Je vous ai présenté là une approche pratique la plus proche possible de notre manière habituelle de décrire la nature, mais il existe deux autres manières plus abstraites de définir les fermions :

- Ce sont des particules de spin demi-entier, comme 0,5 par exemple, ou bien
- Ce sont des particules obéissant au principe d'exclusion de Pauli.

Je n'aborderai pas la première de ces deux définitions théoriques parce qu'elle exigerait d'entrer dans la mécanique quantique que vous récusiez pour ce soir, et ne commenterai que la seconde parce qu'elle est plus facile à cerner à partir de l'approche macroscopique qui nous est habituelle.

Considérez ce caillou que je ramasse, il occupe à un moment donné un certain volume d'espace et vous ne pouvez pas loger au même moment un autre caillou dans ce même

volume d'espace, c'est une évidence et c'est un caractère propre de la matière de ne pas partager le volume d'espace qu'elle occupe avec une autre matière qu'elle exclut donc de cet endroit. Si vous descendez à l'échelle des particules, c'est à peu près cela le principe d'exclusion de Pauli applicable aux fermions de matière ; il dit qu'il est interdit à un fermion de partager avec un autre fermion la même position et la même vitesse au même moment, et aussi quelques autres nombres comme le spin, nommés attributs quantiques, dont j'essaierai de vous donner une idée plus tard. Dans l'atome c'est ce principe qui régit le nombre d'électrons sur chaque orbite et leur répartition sur différentes orbites afin qu'ils ne se marchent pas sur les pieds.

Prenez par exemple l'atome le plus simple, l'hydrogène : un proton, un électron, les charges électriques s'équilibrent, l'atome est neutre, $+1-1 = 0$, c'est tout simple. Passez à l'hélium : deux protons, donc on pourrait penser qu'il suffit de rajouter un électron pour avoir l'atome d'hélium neutre $+2-2 = 0$, mais Pauli dit que le deuxième électron ne peut pas être tout à fait dans le même état que le premier, il est accepté si son spin est dans le sens opposé. Et vous pouvez continuer comme cela à augmenter le nombre de protons et d'électrons pour passer au lithium qui a 3 protons et trois électrons, il faudra alors mettre le troisième électron sur une autre orbite car la première orbite n'en tolère que deux de spin opposé, et ainsi de suite vers les corps de plus en plus lourds ; jamais vous ne pourrez disposer deux électrons ayant les mêmes attributs au même endroit, même dans l'uranium avec ses 92 électrons, vous n'en trouverez pas deux ayant la même position et le même attribut quantique.

L'implication spectaculaire du principe de Pauli, c'est que si vous essayez de mettre deux électrons identiques au même endroit, une force électrique de résistance colossale s'y oppose, qui est la raison même de l'impénétrabilité de la matière, bien qu'elle soit constituée d'espace vide à plus de 99,99 %. C'est pour cela qu'on ne peut pas passer à travers un mur.

Vous sentez bien que cette impénétrabilité des fermions qu'exprime ce principe d'exclusion de Pauli constitue l'essence même de la matérialité.

Pour en terminer avec la matière, n'oubliez pas qu'à chaque particule de matière, qu'elle soit élémentaire ou composite, correspond une particule de l'antimatière correspondante : à l'électron correspond le positon, au quark X correspond l'antiquark X, au proton correspond l'antiproton...etc. A chaque espèce de fermion correspond la particule d'antimatière correspondante, son antifermion, qui a la même masse, mais des attributs internes opposés, comme la charge électrique et le moment magnétique. Ainsi l'antiproton est un proton de même spin, mais de charge électrique et de moment magnétique inverses, l'antineutron ne peut pas avoir une charge électrique inverse de celle du neutron puisque celle-ci est nulle, mais il a un moment magnétique inverse.

Notez enfin que le nombre de fermions de la matière est invariable depuis la nuit des temps, contrairement aux bosons qui sont libres de proliférer. Si vous ajoutez un proton supplémentaire à l'univers, vous créez obligatoirement et simultanément un antiproton.

Venons en maintenant aux autres particules, qui ne sont pas de la matière : ce sont les bosons, qui sont les supports des quatre forces fondamentales de la nature, que l'on appelle en langage plus moderne des interactions, en se faisant leurs messagers et en les appliquant aux fermions qui subissent l'action ; on pourrait, en faisant une comparaison hasardeuse avec l'informatique, dire que les bosons qui donnent des ordres sont le software et les fermions bien matériels qui exécutent les ordres sont le hardware.

Les bosons ont un comportement collectif tout à fait contraire à celui des fermions, ils peuvent coexister en grand nombre en un même endroit et dans un état identique et créer ainsi une intensité d'action considérable, on dit en termes savants qu'ils obéissent à la statistique de Bose-Einstein, d'où leur nom. C'est ce que vous pouvez observer en éclairant ma carte IGN avec vos trois lampes torches, qui envoient des photons qui sont les bosons de l'interaction électromagnétique : vous constatez que les photons se superposent aisément sur ma carte en l'éclairant davantage, on peut les concentrer en faisceaux de lumière puissants, même s'ils sont de fréquence et polarisation égales comme dans le laser, et obtenir des puissances d'éclairage ou d'émission radio accrues, alors que vous ne pouvez pas additionner des cailloux identiques dans le même espace pour obtenir un caillou plus dense.

Les bosons portent aussi comme les fermions une énergie, et on peut en dépensant un peu d'énergie en ajouter à l'univers autant qu'on veut, contrairement aux fermions, sans être obligé de créer en même temps des antibosons, qui n'existent pas. Nous émettons tous les quatre en ce moment des quantités de bosons sous forme de photons messagers d'ondes électromagnétiques infrarouges, qui puisent leur énergie dans le minestrone que nous avons

mangé ce soir et vont réchauffer notre tente en refroidissant notre corps. L'émission de photons ne cesse qu'au zéro absolu.

Il y a 13 bosons élémentaires :

- Le photon, peu énergétique puisqu'il ne coûte que quelques électronvolts dans la gamme du visible, c'est l'agent de la force électromagnétique agissant sur les particules chargées électriquement, hadrons ou leptons ; il est de portée infinie.
- Le graviton, agent encore un peu hypothétique de la force de gravité agissant sur toute masse, donc toute matière, et de portée infinie.
- 8 gluons coûtant environ 10 MeV, agents de la force forte agissant entre les quarks du noyau de l'atome en changeant la couleur, de portée très courte d'environ 10^{-13} cm.
- A cela s'ajoutent trois bosons lourds ayant une masse de l'ordre de 100 protons et une durée de vie très courte de 10^{-24} seconde ; ils coûtent environ 100 GeV et se nomment W^+ , W^- et Z^0 . Ils sont les agents de la force faible, de portée encore plus courte, inférieure à 10^{-16} cm, qui agit sur tous les hadrons et les leptons et permet les transmutations de particules en changeant la saveur des quarks ; ce sont les derniers bosons découverts en 1983 et ils ont valu le prix Nobel 1985 au directeur du CERN Carlo Rubbia et à son équipe.

Restent les bosons non élémentaires, mais composites dont nous avons parlé en même temps que des fermions parce qu'ils sont constitués d'une paire quark-antiquark de même couleur : ce sont les mésons, agents de la force forte agglutinant entre eux les nucléons comme les protons et neutrons au sein du noyau de l'atome.

Je pense avoir répondu à la première question de Noël, et en même temps à la troisième de Robin sur les bosons, sauf peut-être au sujet des neutrinos qu'il percevait plutôt comme des bosons que comme des fermions ; il est vrai qu'ils semblent être sans masse, voyagent à la vitesse de la lumière, et qu'ils ressemblent par ces côtés aux photons qui sont des bosons, mais ils respectent le principe d'exclusion de Pauli et ne sont pas concentrables comme les bosons : ce sont donc des fermions.

Il ne nous reste plus qu'à répondre à Grisella sur les attributs des particules avant d'aller dormir. Je vais essayer de ne pas trop en oublier :

- Il y a la charge électrique. Ne me demandez pas ce que c'est car je risque de vous faire la même réponse que saint Augustin au sujet du temps. Mais, comme pour le temps, on sait la mesurer par son interaction avec d'autres charges électriques à travers l'interaction électromagnétique. On peut dire que la charge électrique est la quantité physique globalement conservée lors d'une interaction électromagnétique.
- Il y a le spin : c'est une grandeur qui ressemble à un moment cinétique de rotation interne intrinsèque d'une particule. N'essayez pas de l'imaginer pour une particule élémentaire, qui n'a pas de volume donc selon la théorie classique pas de possibilité d'avoir un moment cinétique, mais nous ne sommes plus en théorie classique, le spin est un attribut quantique ; considérez le donc comme l'image d'une rotation de la particule sur elle-même. Le produit de l'énergie de rotation par la période de rotation est un multiple entier de la moitié de la constante de Planck h de la théorie quantique sur laquelle nous pourrions revenir demain si vous n'êtes pas trop dégoûtés de la physique ; ce produit constitue la définition du spin, qui ne prend donc que des valeurs semi-entières ou entières, les premières étant l'attribut des fermions et les secondes l'attribut des bosons. Les quarks et les électrons ont un spin de $0,5 h$, l'image qu'on peut former de ce spin $0,5 h$ est que la particule fait deux tours sur elle-même pour se retrouver dans le même état ; les photons et les gluons ont un spin de $1 h$.
- Et bien sûr il y a la masse, dont la valeur au repos représente l'énergie de création de la particule. C'est l'attribut qui vient le premier à l'esprit, mais je l'ai gardé pour la bonne bouche car c'est un des plus intrigants et embarrassants par sa grande diversité d'une particule à l'autre ; elle n'a pas des valeurs aussi simples que la charge électrique ou le spin qui ne prennent que deux ou trois valeurs discrètes, elle varie de $1/2000$ de la masse du proton pour l'électron à 100 protons pour un boson Z, un quark t est 35000 fois plus massif qu'un quark u , et elle croît bien sûr avec la vitesse suivant la loi de la relativité.

Pourquoi cette diversité des masses? On n'aperçoit pas de réponse simple à cette dispersion qui masque peut-être la vraie symétrie du monde. La tentative de réponse actuelle est dans le champ de Higgs, où la masse ne serait plus une propriété intrinsèque de la matière, mais un attribut qui lui aurait été accroché à un certain moment de l'histoire par un certain boson que l'on n'avait pas encore découvert jusqu'en juillet 2012, mais le CERN vient d'annoncer avoir enfin d'aperçu, avec un degré de confiance de 99,99997 %, un nouveau boson dans un domaine de masse de l'ordre de $125 \text{ GeV}\cdot\text{c}^{-2}$ (soit 133 fois la masse du proton), compatible avec celui attendu pour le boson de Higgs. Des études complémentaires devront déterminer si toutes les caractéristiques attendues du boson de Higgs sont bien au rendez-vous.

Ce fameux boson qui attribue les masses aux particules est un point dur de la compréhension, mais après tout, l'énergie d'une particule ne lui est pas non plus attachée, puisqu'elle dépend de la position de cette particule dans un champ gravitationnel ou dans un champ électromagnétique. Le champ de Higgs qui aurait attribué ces masses serait neutralisé au dessus de $10^{15}K$, et n'aurait donc pas été actif au tout début de la création, puis se serait formé lors du refroidissement, vers $10^{15}K$, et aurait alors attribué des masses non nulles à telle ou telle particule qui, dès lors a du ralentir sa course à une vitesse inférieure à celle de la lumière.

Cette « sacrée particule de Higgs », comme la qualifie Léon Lederman²², prix Nobel 1988, qui l'identifie un peu à Dieu et serait à l'origine du développement de toute la diversité du monde, a fait l'objet de recherches actives ces dernières décennies pour vérifier son existence et faire un pas de plus dans la compréhension du monde, et je ne résiste pas au plaisir de citer Lederman qui avec son humour habituel a écrit sur le champ de Higgs son « très nouveau testament » :

Et le Seigneur regarda le monde qu'Il avait créé et s'émerveilla de sa beauté, tant de beauté que le Seigneur en pleura. C'était un monde avec une seule sorte de particule et une seule force transportée par un seul messenger qui était également, divine simplicité, la seule particule.

Et le Seigneur regarda le monde qu'Il avait créé et vit que le monde était bien ennuyeux. Alors le Seigneur reprit ses calculs, et sourit et imposa à son univers une expansion puis un refroidissement. Et alors l'univers devint assez froid pour que son véritable médiateur, le champ de Higgs, incapable d'intervenir avant le refroidissement, entre en scène. Et sous l'influence de Higgs les particules pompèrent de l'énergie au champ et absorbèrent cette énergie et devinrent massives. Chacune à sa manière. Quelques unes devinrent incroyablement massives, certaines un petit peu seulement et d'autres pas du tout. Et tandis qu'il y avait auparavant une seule particule il y en eu alors douze et alors que le messenger et la particule ne faisaient qu'un, maintenant ils étaient différents et tandis qu'auparavant il y avait un seul transporteur de force et une seule force, maintenant il y avait douze porteurs et quatre forces et tandis qu'auparavant il y avait l'infinie beauté dénuée de sens, maintenant il y avait les Démocrates et les Républicains.

Et le Seigneur regarda le monde qu'Il avait créé et fut pris d'un irrésistible éclat de rire. Et il convoqua Higgs et, arrêtant de rire, il lui parla durement et dit :

« Pour quelle raison as-tu détruit la symétrie du monde ? »

Et Higgs, que le moindre signe de désapprobation bouleversait, se défendit en ces termes :

« Oh ! Patron, je n'ai pas détruit la symétrie du monde, j'ai simplement fait en sorte qu'elle soit cachée par l'artifice de la consommation d'énergie.

Qui aurait pu prévoir qu'à partir de ce morne paysage composé d'objets semblables nous aurions des noyaux et des atomes et des molécules et des planètes et des étoiles ?

Qui aurait pu prévoir les couchers de soleil et les océans et le limon organique formé par toutes ces redoutables molécules agitées par les éclairs et la chaleur ? Et qui aurait pu prévoir cette évolution et ces physiciens fouillant, explorant, cherchant à mettre en évidence ce que pour Votre service j'avais si soigneusement caché ? »

Et le Seigneur, ayant du mal à réprimer son rire, accorda son pardon et une belle augmentation à Higgs.

Le très nouveau testament, 3-1²³

²² Léon Lederman *Une sacrée particule* Odile Jacob 1996.

²³ Léon Lederman *Une sacrée particule* p361 Odile Jacob 1996.

- Je ne me doutais pas que les prix Nobel avaient tant d'humour, et sous cette forme plaisante j'entrevois mieux le rôle de cette fameuse particule de Higgs qu'avec un fatras d'équations auxquelles je ne comprendrais rien, apprécia Grisella.

- Je ne vous ai cité que les trois principaux attributs intervenant le plus fréquemment dans la description du microcosme, reprit Kirgard, mais il y en a encore tellement d'autres, tels que le moment angulaire pour un électron, qui représente la vitesse à laquelle il se meut sur son orbite, l'orientation de l'orbite et sa forme, la durée de vie qui est liée à la masse, et toutes les quantités qui peuvent être conservées au cours de certains processus subnucléaires, nucléaires ou atomiques, comme la parité, l'isospin, les saveurs et les couleurs des quarks, le nombre baryonique, le nombre leptonique...etc.

Mais rappelez-vous que nous faisons une randonnée en montagne et pas un cours complet de physique théorique et cette fois-ci il est vraiment temps d'aller se coucher ; je voudrais seulement ne pas vous laisser sur l'impression d'une liste à la Prévert, mais vous indiquer le pourquoi de tous ces attributs.

En physique classique, il existe trois grandes lois de conservation : l'énergie, la quantité de mouvement et le moment cinétique ; la physique quantique en a introduit un grand nombre d'autres, où tel ou tel attribut comme la parité, le spin ou la charge électrique, est conservé au cours d'une interaction entre particules. La liste, non exhaustive, des attributs que je viens de vous citer vous donne une idée des nombreuses lois de conservation qui jalonnent les phénomènes de la physique quantique.

- Vous nous avez bien résumé en quoi consiste la boîte de Légo de l'univers, intervint Noël, et elle contient finalement très peu de pièces différentes, mais qui permettent de réaliser infiniment plus de combinaisons qu'une boîte de Légo ; pourtant ce qui n'était pas au programme de votre exposé, et je le comprends, c'est le software de tous ces merveilleux assemblages : pourquoi un assemblage de quarks et d'électrons selon le software "lys Martagon" possède-t-il une propriété qui s'appelle "beauté" ?

- Sacré Noël, toujours à tourner autour du problème de la beauté, tu sais bien que je n'ai pas de réponse, alors mettons vraiment un terme à notre causerie de ce soir et bonne nuit à tous.

- Bonne nuit, professeur.

Ils jetèrent un dernier coup d'œil au ciel resplendissant d'étoiles, les têtes rentrèrent dans les tentes et on n'entendit plus pendant quelques secondes que le glissement des fermetures éclair qui verrouillait chacun pour une nuit froide.

5

*Ce petit, il n'en fait qu'à sa tête,
Je ne suis pas sûr qu'il sera à cet endroit, il court si vite,*

Mais je sais où j'ai une chance de le trouver.

Un brouillard dense les enveloppait au réveil .

- Voilà qui n'était pas prévu au programme, claironna Robin qui sortait la tête de sa tente le premier, j'espère que ce n'est qu'une brume locale autour du lac et pas l'annonce d'un changement de temps.

Les autres têtes ensommeillées émergèrent successivement des glissières des tentes, scrutant le ciel d'un air dubitatif, surpris par cette atmosphère cotonneuse après le splendide ciel étoilé des deux soirées précédentes.

- Eh bien ! voilà une atmosphère idéale pour entrer dans le monde quantique que vous avez laissé de côté hier soir, professeur, lança Grisella, parce qu'en ce qui me concerne, le peu que j'en connais est aussi flou que ce brouillard.

- Oh là ! du calme, Grisella, ne démarre pas sur les chapeaux de roue. Tu ferais mieux de nous préparer d'abord un bon café, rétorqua Robin.

- Quel macho ! ce type ; moi, un verre de grenadine me suffit, même après une nuit fraîche.

- Chacun sait que la femme est plus coriace que l'homme qui a besoin de plus de soins attentifs, plaida le professeur, et moi je ne serai pas capable d'aborder la journée sans avoir d'abord avalé un bon café bien chaud pour me nettoyer la tête.

Le petit groupe s'égailla au bord du lac, les uns faisant des toilettes de chat en s'aspergeant rapidement de l'eau glacée du lac, les autres se lançant dans de courtes et violentes accélérations de jogging pour se réchauffer. On n'y voyait pas à dix mètres et lorsqu'ils se perdaient de vue, seules leurs voix leur permettaient de se repérer.

- J'espère que vous verrez tous le bord du lac et que personne ne tombera dedans, cria le professeur dans la brume.

Quelques minutes après, ils réapparurent l'un après l'autre en émergeant du coton.

- J'ai presque eu du mal à retrouver notre campement, dit Noël, et je me suis un peu guidé à l'odeur du café.

- En effet, ça sent le café bien chaud ; quelle est la bonne âme qui s'est dévouée pour nous préparer notre breuvage matinal ? et merci à elle, dit Kirgard en s'asseyant en tailleur.

Aucune réponse ne vint, Grisella sirotait sa grenadine à l'écart.

- Nous voilà déjà dans le monde quantique avec ce café qui arrive on ne sait comment ni par qui, ironisa Noël, car c'est à peu près ça, professeur, les événements surviennent sans qu'on sache trop comment, ni s'ils ont une cause, non ?

- Oui, Noël, c'est un peu ça, mais laisse-nous déjà le boire, ce café, dit Kirgard en tendant sa tasse, cela me donnera au moins le temps de mieux comprendre ce que vous attendez de moi, car je me demande bien par quel bout on peut commencer un sujet aussi vaste. Je ne vais tout de même pas vous refaire votre cours de physique quantique puisque vous avez tous, sauf peut-être Grisella, abordé ce domaine dans vos études ; dites-moi plutôt où sont les points les moins clairs pour vous.

- C'est bien là le problème, répondit Robin : je crois qu'on a tous à peu près compris le cours, mais je crois qu'on ne se l'approprie pas vraiment ; c'est comme une greffe d'organe qui ne prend pas, car nous avons passé des années à apprendre la physique classique, puis on nous assène tardivement un cours de physique quantique complémentaire qui contredit pas mal de notions bien ancrées de la physique classique, et on a le sentiment qu'il y a deux physiques contradictoires dont on ne fait pas toujours bien le partage et dont on se demande s'il faut jeter la première aux orties. Et puis la physique quantique est trop différente de ce que nos sens nous ont habitués à percevoir pour qu'on l'intègre vraiment.

- Toujours tes cinq sens comme référence ! Robin, mais tu sais bien que tes sens te renseignent seulement sur notre monde macroscopique, et encore faut-il s'en méfier puisque à la suite d'Aristote on a longtemps cru que la terre était plate et au centre du monde, que les corps lourds tombaient plus vite que les corps légers et qu'une force était nécessaire pour qu'un corps se déplace car son état naturel était le repos.

- Toujours mes sens ! Peut-être, mais si je me brûle le doigt en le trempant dans ma tasse de café, je me moque bien de savoir que j'ai mesuré à la main l'augmentation de la vitesse moyenne du mouvement brownien des molécules d'eau ! Ils sont tout de même indispensables pour bien vivre, ces sens !

- Tu changes de contexte avec une mauvaise foi désarmante, répliqua Kirgard ; si tu te places dans le contexte du microcosme, tu dois honnêtement avouer que tes sens ne te sont plus d'une grande utilité, en aucun cas ils ne te renseignent sur le comportement des composants microscopiques du monde, et pour pénétrer dans ce domaine, il faut renoncer à l'hégémonie des sens.

Mais rassure-toi Robin, cette gêne que provoque la physique quantique a été ressentie par tous ceux qui s'en sont approchés ; Einstein lui-même ne l'a jamais vraiment acceptée, même après avoir participé pendant dix ans à sa création, il en a même dit : «Si la mécanique quantique est vraie, le monde est fou» et il a écrit en 1935 : «On ne peut attendre d'aucune définition raisonnable de la réalité qu'elle permette cela»²⁴, et pourtant Einstein s'est trompé, elle permet apparemment cela.

Mais le sujet est trop vaste et vous m'avez fatigué hier soir en me faisant discourir sur la matière. Ne serait-il pas mieux d'inverser les rôles et que vous résumiez vous-même ce que vous avez retenu de chacun de ses aspects pour que je comprenne mieux où sont vos questions: continu et discontinu, ondes et particules, principe d'incertitude, qui veut commencer ?

²⁴ Selleri, *Le grand débat de la théorie quantique* Champs Flammarion 1994

Après quelques secondes de perplexité, Noël réagit :

- s'il faut aider le professeur à démarrer, je veux bien commencer par le plus simple, qui est le mélange des genres ondes et particules. Pour comprendre de quoi est faite la lumière, on a hésité pendant plusieurs siècles entre une théorie corpusculaire et une théorie ondulatoire.

La théorie corpusculaire, voit les rayons lumineux comme des trajectoires de petites billes de lumière, car Newton avait observé que la lumière se réfléchissait sur un miroir exactement comme une balle rebondit sur un mur, cela l'avait convaincu qu'il y avait dans les rayons lumineux des petites billes lumineuses, et ce fut la grande gloire de l'optique géométrique

Le pauvre Huygens avait lancé à la même époque sans grand succès l'idée des ondes de lumière, qui n'émergea de l'indifférence qu'un siècle plus tard quand Fresnel expliqua les jolies colorations que prennent au soleil les taches d'huiles flottant sur l'eau ou les bulles de savon par les différentes longueurs d'ondes des diverses couleurs composant la lumière blanche du soleil, qui se réfléchissent avec des couleurs différentes selon l'épaisseur de peau de la bulle.

Toutes les études portant sur des phénomènes lumineux se raccrochaient soit à l'une, soit à l'autre de ces théories qui avaient chacune leur domaine d'efficacité et ont connu chacune des hauts et des bas, mais restaient étrangères l'une à l'autre.

En ce qui concerne la théorie ondulatoire, il restait à comprendre qu'est-ce qui ondulait ? C'est Maxwell qui a finalement clarifié la question à la fin du XIX^{ème} siècle en démontrant que la lumière était une onde électromagnétique parmi d'autres, comme celles transmettant maintenant les informations par radio et télévision, mais dans une plage particulière de longueur d'onde. C'était le triomphe de la théorie ondulatoire !

Mais ce triomphe n'a duré qu'une génération, jusqu'à ce que Planck et Einstein constatent que l'énergie transportée par la lumière n'était pas divisible à l'infini lorsqu'on réduisait l'intensité lumineuse, mais qu'il y avait une limite, un "grain" de lumière que Einstein appela photon, transportant un "grain" d'énergie, et que cette énergie E du grain était proportionnelle à la fréquence f de la lumière utilisée $E = h.f$, la constante de proportionnalité h étant cette fameuse constante de Plank, nommée quantum d'action, qui est la plus petite action possible, qui fixe le niveau d'énergie des «grains» de lumière.

La théorie corpusculaire était donc remise en selle, il y avait des particules de lumière comme il y avait des particules de matière que l'on connaissait déjà. Mais tout cela restait compréhensible et les deux notions de particule physique et d'onde physique pouvaient continuer à se côtoyer comme concepts complémentaires.

Là où les choses sont devenues plus mystérieuses, c'est en reprenant la vieille expérience de Young avec une paroi percée de deux fentes parallèles, face à une source lumineuse, qui reste l'exemple le plus fameux de la nature contre-intuitive de la physique quantique.

Lorsqu'on regarde l'image portée sur un écran situé derrière la paroi, on y voit ces franges d'interférences qui étaient déjà connues et servaient de justificatif à la thèse ondulatoire de la lumière ; si on bouche une fente, on ne voit plus qu'un seul impact de lumière face à l'autre fente resté ouverte, et réciproquement si on ferme cet autre fente, ce qui justifie la thèse corpusculaire. Tout cela est explicable par les deux théories juxtaposées.

Mais là où les choses se gâtent, c'est que lorsque l'on a su envoyer de la lumière au compte goutte, photon par photon, et non plus seulement par milliards de milliards de photons comme dans le moindre pinceau lumineux, on a repris l'expérience avec un papier photographique au lieu d'écran pour enregistrer la trace de chaque photon, et le résultat a stupéfié les physiciens :

Avec une seule fente, on observe bien une seule tache en face, image des points d'impacts successifs des photons tirés en file indienne, ce qui confirme que le photon se comporte comme une balle de fusil. Avec deux fentes on s'attendrait à trouver deux taches en face de chacune d'elles, puisque chaque photon corpuscule passe soit par l'une, soit par l'autre, or il n'en est rien, on observe la formation lente, photon par photon, des mêmes franges d'interférence qu'avec des pinceaux de lumière de milliards de photons simultanés, dont on interprétait l'interférence comme celle de deux ondes sphériques ayant comme origines la sortie des deux fentes.

Cela semble vouloir dire que l'on retrouve dans chaque photon émis séparément un comportement ondulatoire individuel ! Mais qu'est-ce donc alors que cette onde associée au photon isolé ?

Ce n'est plus une onde d'une grandeur physique comme une vitesse ou une pression, mais selon Born et De Broglie, c'est une onde mathématique de probabilité de présence du photon dans le plan de l'écran, donc de probabilité d'impact ; et ces ondes de probabilité interfèrent entre elles comme les ondes physiques, donnant ces dessins de franges qui illustrent la distribution de cette probabilité d'impact des photons sur l'écran.

Le mystère central de la physique quantique commence à ce constat et ouvre un abîme de perplexité : Pourquoi les photons individuels ne font-ils pas deux taches en face des deux fentes, mais construisent progressivement une image d'interférence ?, comme si chaque photon passait à la fois par les deux trous et interférait avec lui-même, ce qui est une phrase qui n'a pas de sens puisque le photon est indivisible.

Dans son enquête, le physicien un peu détective pose alors un détecteur de passage de photons au droit de chaque fente pour noter par laquelle est passé chaque photon : le détecteur ne voit passer que des photons entiers comme on pouvait l'espérer, jamais des moitiés de photons, et ils passent soit par une fente, soit par l'autre comme des photons civilisés, mais quand on regarde le papier photo, on n'y voit plus trace d'interférences, mais deux traces d'impacts en face des fentes ! Le comportement ondulatoire a disparu !

Le photon se comporte comme un voyou qui se sait surveillé par la police et change son comportement ; quand on essaie de suivre un photon, il se comporte comme une particule qui laisse une trace ponctuelle sur un papier photographique, mais quand on ne le regarde pas, il se comporte comme une onde ! C'est ça le mélange des genres.

Ce monde est bien étrange : si on ne le regarde pas, le photon semble "savoir" qu'il y a deux fentes, et bien que passant par une seule, il choisit son impact en tenant compte de l'existence des deux. Si on ferme une fente, il semble "savoir" qu'il n'y en a qu'une et choisit un impact direct dans l'axe de la fente. Si on regarde au droit des deux fentes ouvertes pour savoir par où il passe, on le voit passer gentiment par l'un ou par l'autre et aller faire une trace en face de chacune d'elles.

Mais alors, cela signifie que le comportement du photon dépend de la décision de l'expérimentateur de "regarder" ou non ce qu'il fait à tel endroit de sa trajectoire supposée ? C'est un coup sérieux porté à nos chères croyances dans les relations causales qui sont un pilier de la physique classique et même de la logique, puisqu'une décision de l'expérimentateur peut changer le déroulement d'un phénomène physique où pourtant toutes les conditions initiales et le dispositif expérimental semblent les mêmes.

Cela veut-il dire qu'il faille considérer que l'expérimentateur fait lui-même partie de l'expérience au même titre que le canon à photons et les fentes de la paroi ? et que ses décisions sont des données du problème, tout comme le nombre et la disposition des fentes sur la paroi ? C'est la porte ouverte à la scientisation de la parapsychologie, un pas que d'aucuns n'hésitent pas à franchir en croyant qu'on peut tordre des petites cuillers à distance par la seule action de la volonté.

Certains vont jusqu'à douter de l'existence de la particule pendant son trajet, car si nous ne pouvons pas dire ce que fait une particule quand nous ne l'observons pas, nous ne pouvons être certains qu'elle existe ; au niveau subatomique, la matière n'existe pas avec certitude à des endroits définis, mais manifeste plutôt une "tendance à exister". C'est un genre nouveau entre l'existence et la non-existence. Il n'y a pas de réalité permanente dans le monde quantique, ce qu'on observe dépend de ce qu'on a décidé d'observer.

Nous sommes habitués dans notre monde macroscopique à manipuler des objets "réels", qui ont des propriétés définies par cette réalité permanente, qu'on les observe ou non, alors que les objets quantiques ne semblent pas être des objets "réels" puisque leurs propriétés ne peuvent pas être définies en dehors de leur observation.

Ces commentaires font chavirer l'esprit parce qu'ils tentent d'expliquer des phénomènes à l'échelle des particules avec le langage de notre monde macroscopique. La position pragmatique, dite de Copenhague, parce c'est celle d'un certain nombre de savants qui s'y

réunissaient autour de Bohr pour débattre de ces phénomènes, consiste à accepter d'ignorer, ou mieux, à vouloir ignorer comment cela s'est passé et à se contenter du résultat.

- C'est donc bien comme l'arrivée du café de ce matin ! , interrompit Robin.

- Pour ces pragmatiques, continua Noël, il faut abandonner l'idée qu'une particule allant d'un point A à un point B suive nécessairement un trajet fixé par une loi, le trajet est inconnaissable et tous les trajets sont possibles, chacun ayant sa probabilité. C'est un peu comme un joueur d'échecs qui déplace son cheval, on sait d'où il part et on voit où il arrive, mais personne ne se demande s'il y est allé en se déplaçant de deux cases à droite puis d'une case vers le haut ou par une case en haut puis deux à droite, c'est une question qui n'a pas de raison d'être posée, la notion de trajet est effacée de la physique quantique.

Les physiciens qui évitent dans leur travail d'employer un langage poétique disent que le résultat observable du comportement du photon dépend de la configuration globale du système, et que ce comportement présente un caractère "holistique", c'est-à-dire qui tient compte de la globalité du dispositif utilisé, ce qui, entre nous, revient à dire que le photon "sait" s'il y a un trou ou deux trous avant de choisir son point d'impact, mais c'est dit en des termes qui ne permettent pas d'attribuer une conscience au photon.

- Eh bien bravo professeur Noël ! Tu as tout compris, approuva Kirgard, alors où est le problème ? Tu n'es pas le seul à ne pas pouvoir t'expliquer le dilemme du photon qui rencontre deux trous.

Un petit correctif toutefois à ton exposé : les pragmatiques de l'école de Copenhague ont tout de même quelques arguments sérieux pour éviter de se poser des questions sur la trajectoire ; ils disent que les seules questions utiles sont celles auxquelles on peut répondre par une mesure et que les autres n'ont pas d'intérêt à être posées car on ne peut y répondre que par du bavardage : si on essaie de mesurer la trajectoire d'un photon ou d'un électron entre le canon et l'écran, on modifie le dispositif expérimental et on modifie le mouvement de la particule, et ce n'est pas seulement par une décision de nature mentale comme tu l'as évoqué, car les instruments de mesure ne peuvent être à une échelle si petite qu'ils ne perturbent pas le comportement de ces êtres fragiles que sont les particules, même si on emploie astucieusement pour faire cette mesure les particules elles-mêmes, puisqu'un photon envoyé en mission pour permettre de «voir» un électron perturbe son mouvement. Si on l'éclaire avec des photons de courte longueur d'onde pour voir plus finement sa position, ces photons de haute énergie augmentent le flou de son mouvement.

Depuis 80 ans que la physique quantique existe, la plupart des physiciens utilisent ses recettes de calcul en évitant de se poser des questions de nature philosophique, ils sont un peu comme Robin qui affecte de mépriser la philosophie ou au moins d'éviter son usage lorsqu'il n'est pas nécessaire.

Ces recettes de la physique quantique sont concentrées dans le calcul de la fonction d'onde à l'aide de l'équation de Schrödinger, qui permet à partir de la connaissance d'un dispositif expérimental donné, de déterminer la probabilité de comportement des particules interagissant avec ce dispositif ; c'est actuellement le seul outil efficace pour faire des prévisions sur le comportement de tout le microcosme, et pas seulement des photons, puisque vous savez que depuis que De Broglie a révélé au monde l'existence des ondes de matière, tout ce que Noël vient de dire du photon, qui n'est pas de la matière, peut être répété intégralement au sujet de l'électron ou du proton, qui sont, eux, de la matière ; la physique quantique s'applique à tout ce qui existe au niveau atomique et subatomique, que ce soient des bosons comme le photon ou des fermions comme le proton ou l'électron. Voilà une belle communauté de comportement de toutes ces particules dont la diversité vous a un peu troublé hier soir.

Ceux des physiciens qui sont sujets à des scrupules philosophiques et se réveillent la nuit en se disant : cela fait quinze ans que j'utilise l'équation de Schrödinger et sa mathématique de la fonction d'onde, je trouve des résultats que les expériences confirment remarquablement et qui ont beaucoup d'applications dans les hautes technologies puisque 25% du P.I.B. des pays industrialisés est fait de produits utilisant la physique quantique, mais je n'ai pas fait un pas vers la compréhension intime du phénomène, ceux là se rendorment en se racontant des versions féeriques comme l'électron qui se dédouble pour passer dans les deux trous à la fois bien qu'il soit une particule élémentaire indivisible, ou bien l'électron intelligent qui compte d'abord le nombre de trous avant de décider de son trajet, ou bien la non-existence réelle de l'électron qui n'est qu'un fantôme tant que son

impact n'a pas été observé, ou bien son ubiquité qui assure sa présence virtuelle en tout point de l'espace tant qu'on ne l'a pas utilisé pour un impact sur un écran derrière un ou deux trous, ou encore un dédoublement de l'univers en univers multiples où chacune des possibilités de choix "existerait" dans chacun de ces univers.

Ce qui les tient le plus longtemps éveillés, c'est lorsqu'ils réfléchissent à la non-localité qui les oblige à imaginer des interactions qui seraient plus rapides que la vitesse de la lumière, nous pourrions y revenir si vous souhaitez, mais pour le moment j'aimerais que vous veniez au deuxième aspect fondamental de la physique quantique qui est la relation d'incertitude d'Heisenberg. C'est peut-être au tour du professeur Robin d'introduire le sujet en résumant ce qu'il en a compris ?

- Je dirai d'abord que ce que j'ai retenu de cette relation d'incertitude est qu'elle est plutôt rassurante parce qu'elle impose des limites au flou artistique de la description quantique, commença Robin, c'est une sorte de codification de l'incertain. Elle dit que pour des couples de grandeurs physiques relatives aux particules, comme par exemple leur *position* et leur *vitesse*, ou bien leur *énergie* et leur *durée de vie*, il existe une relation entre les niveaux de précision que l'on peut acquérir au sujet de chacun des partenaires du couple.

Cette relation impose que le produit des deux incertitudes ne peut pas être inférieur à la constante de Planck h que l'on retrouve ici, ou plus exactement à $h/2\pi$, ce qui introduit donc obligatoirement un flou dans la description des phénomènes du microcosme, mais en même temps limite ce flou, car h est une unité extrêmement petite, c'est la plus petite action possible, qui vaut $6,6 \cdot 10^{-34}$ joule. seconde, ou si vous préférez, environ $4 \cdot 10^{-15}$ eV. seconde.

Ce principe d'incertitude signifie par exemple qu'on ne peut espérer mesurer à la fois la position et la vitesse d'une particule avec une très grande précision ; si la minuscule constante de Planck était quelques milliards de milliards de milliards de fois plus grande, cela signifierait que la police des autoroutes ne pourrait plus assurer qu'à tel endroit et à telle heure, tel automobiliste roulait à 180 km/h avec une marge d'erreur de 1 km/h, car l'automobiliste pourrait prétendre qu'à ce moment il se trouvait à 30 kilomètres de là sans que les détecteurs de la police puissent prouver le contraire.

La police aurait un peu moins de difficulté à contrôler les camions parce qu'ils sont beaucoup plus lourds et que la constante de Planck h est en fait une unité d'action, qui s'exprime par le produit d'une énergie E par un temps t , ou ce qui est la même chose, le produit d'une longueur l par une quantité de mouvement $p = m \cdot v$. Comme c'est le produit $m \cdot v \cdot l$ des véhicules qui est mesuré à h près, plus le véhicule est lourd, mieux sa vitesse sera connue en un endroit donné. Cela veut dire que dans le monde des particules, il est plus facile de suivre l'évolution des particules lourdes que celle des particules légères.

- Grisella fronça les sourcils : mais alors, quid des photons de tout à l'heure, qui sont les plus légers puisqu'ils ont une masse nulle, donc d'après cette relation d'incertitude, puisque $m = 0$, le produit $v \cdot l$ est indéterminé et on ne peut rien savoir ni de leur position ni de leur vitesse.... mais j'ai sans doute encore parlé trop vite, puisque la vitesse, suis-je sotté, on la connaît déjà puisque c'est celle de la lumière par définition du photon, mais comment est-ce compatible avec $m = 0$?

- Rassure toi, Grisella, cette fois ta question est tout à fait pertinente, intervint le professeur, et Louis De Broglie se l'était aussi posée²⁵, car curieusement il n'était pas convaincu que la masse du photon fût totalement nulle ; il essayait de lui appliquer la loi d'Einstein $E = m \cdot c^2$, en n'oubliant pas que la masse m à grande vitesse est multipliée par le facteur relativiste très majorant $(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ qui tend vers l'infini quand v se rapproche de c . Il en résulte que si dans l'expression de la masse relativiste $m = m_0 \cdot (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, on fait tendre la masse m_0 du photon vers zéro et sa vitesse v vers c , cette masse relativiste m prend la forme indéterminée $0/0$, ce qui ne fait pas beaucoup avancer les choses.

De Broglie prit alors le problème par un autre bout : il reprit l'écriture de l'énergie sous la forme Einsteinienne $E = m \cdot c^2$ et l'écrivit $E = (m \cdot c) \cdot c = p \cdot c$, où p est la quantité de mouvement, et la compara pour un photon à l'autre expression de l'énergie : $E = h \cdot f$, ou si vous préférez $E = h \cdot c / \lambda$, c étant la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde, d'où il tira sa célèbre formule $p = h / \lambda$, qui signifie que même avec sa masse nulle mais grâce à sa vitesse c de la lumière, le photon possède une quantité de mouvement $p = h / \lambda$, ce qui rappelle que la lumière bleue, ou mieux, ultra violette, de longueur d'onde plus courte, possède un pouvoir de percussion plus violent qui explique que vous avez tous viré au rouge chocolaté depuis que nous errons entre 2000 et 3000 mètres. Donc rassure-toi, Grisella, le principe d'incertitude s'applique aussi au comportement des photons.

²⁵ *La découverte des ondes de matière*. Actes du colloque de l'Académie des sciences Paris juin 1994.

Admirez en passant cette relation entre une grandeur de nature corpusculaire qui est la quantité de mouvement p , et une grandeur ondulatoire qui est la longueur d'onde λ . Ce premier pont jeté par De Broglie²⁶ entre les deux théories lui a donné l'idée d'écrire $p = h / \lambda$ sous la forme inverse $\lambda = h / p$ et de se dire : puisqu'une longueur d'onde de photon conduit à une quantité de mouvement, pourquoi inversement la matière -un électron par exemple- qui possède une masse et une vitesse, donc une quantité de mouvement n'aurait-elle pas une onde associée de longueur λ reliée par la même relation ? Et ce fut la découverte des ondes de matière, d'autant plus courtes que la masse des particules est élevée, ondes qui ont été confirmées expérimentalement par la suite, et sont utilisées maintenant dans les microscopes électroniques et protoniques dont les pouvoirs séparateurs sont plus élevés que celui des photons de la lumière, grâce à ces longueurs d'onde plus courtes.

Ces ondes de matière s'appliquent aussi à notre monde macroscopique, mais ses effets sont alors imperceptibles car si vous calculez la longueur de l'onde associée à votre tasse de café par la formule de De Broglie $\lambda = h / m.v$, la masse de votre tasse est tellement gigantesque par rapport à h , et donc la longueur d'onde est si courte que les aspects ondulatoire et discontinu disparaissent pratiquement sinon théoriquement. C'est donc la composante corpusculaire qui prévaut dans la vie quotidienne où le monde nous semble faits de "corps", et non pas d'ondes, mais c'est en fait toujours un mélange des deux. C'est ce que les physiciens appellent la complémentarité des concepts.

Pour une particule très petite et très légère au contraire, la longueur d'onde de probabilité de présence est beaucoup plus grande et peut devenir du même ordre de grandeur que la taille de la particule elle-même, ce qui ne permet plus de la localiser avec précision et introduit un caractère discontinu dans cette localisation, donc un comportement quantique, alors que pour ma tasse de café, la longueur de l'onde de probabilité de présence associée est terriblement courte, ce qui permet une localisation très précise de cet objet et de ses mouvements et nous persuade du caractère continu du monde qui nous entoure.

La physique quantique appliquée aux objets de grande taille se transforme donc en physique classique, ou si vous préférez, la physique quantique se ramène à la classique pour $h = 0$; mais il y a en réalité annexion de la physique classique par la physique quantique, dont elle n'est qu'une approximation excellente pour le monde macroscopique, tout comme il y a eu annexion de la mécanique classique par la mécanique relativiste dont elle n'est qu'une approximation bien suffisante pour les vitesses n'approchant pas celle de la lumière.

Mais revenons au commentaire de Robin sur la relation d'Heisenberg, que j'ai interrompu par cette digression sur les ondes de matière.

- Robin reprit : à sa publication en 1927, quelques scientifiques avaient mal compris cette relation d'incertitude, et croyaient que c'était la précision de leurs mesures qui était mise en cause, alors qu'il ne s'agit pas de cela, mais d'une incertitude intrinsèque, indépendante de leur génie d'expérimentateur et de leur budget.

- Tu as raison de rappeler cette fausse interprétation car il en reste des traces aujourd'hui encore, dues au fait qu'il est très difficile de faire des mesures non critiquables sur des particules. Si on essaie de mesurer quelque chose sur un être aussi petit, on est obligé, pour en recevoir une image pas trop imprécise, de lui envoyer un rayon électromagnétique de longueur d'onde très courte, donc d'énergie élevée, tel qu'un rayon gamma, qui perturbe la position et la vitesse de l'électron, alors que je ne m'attends pas à ce que ma tasse de café soit affectée par mon regard, parce que les photons qui lui sont arrachés pour venir frapper mon œil ont une énergie négligeable par rapport à la masse de ma tasse.

Soulignons au passage un effet de ce principe d'incertitude, ajouta Kirgard, si on cherche à les localiser dans un espace réduit, elles répondent à cette limitation par une vitesse plus

²⁶ Louis de Broglie, *Continu et discontinu en physique moderne* Albin Michel 1941

élevée en tournoyant, comme le font les électrons autour du noyau à une vitesse de l'ordre de 1000 kilomètres par seconde. C'est cette vitesse énorme qui fait apparaître l'atome comme une sphère rigide dont le diamètre est celui des orbites électroniques. Si vous appliquez cette même règle au noyau lui-même, qui est localisé dans un espace encore beaucoup plus petit que l'atome, vous pourrez calculer que les nucléons tournoient dans le noyau à une vitesse frénétique de 70.000 kilomètres par seconde. Vous percevez là le caractère intrinsèquement dynamique de la matière²⁷. Chaque fois qu'une particule subatomique est localisée dans une petite région de l'espace, elle manifeste cette localisation en s'agitant dans cet espace ; plus la localisation est réduite plus la danse de la particule est frénétique.

Pour toutes les particules contenues dans cette pierre, ça marche, les systèmes dynamiques qui la composent forment des microstructures stables, nucléaires, atomiques et moléculaires qui lui donnent au niveau macroscopique son aspect solide, nous faisant croire qu'elle est faite de quelque substance matérielle passive, ce qui n'a plus de sens au niveau atomique où on ne trouve que des systèmes dynamiques.

Le physicien quantique Born a écrit : «Nous avons atteint la fin de notre journée dans les profondeurs de la matière. Nous avons cherché le sol ferme et n'en avons trouvé aucun. Au plus profond, l'univers devient plus turbulent, plus indéterminé et plus trouble».

Mais je m'aperçois que j'ai encore interrompu le résumé de Robin, cette fois-ci, j'arrête et le laisse aller au bout.

- Robin reprit à nouveau : ce même principe d'incertitude s'applique à toutes les autres combinaisons de grandeurs dites "conjuguées", c'est-à-dire dont le produit a la même dimension que le quantum d'action h , par exemple, le couple *énergie-temps* dont le produit au cours d'une interaction entre particules de l'énergie échangée ΔE par la durée de l'interaction Δt ne peut pas être inférieur à h , ou encore les composantes du vecteur spin,.

Cette inégalité marque l'irruption du discontinu là où on ne l'attendait pas, dans les interactions. Le discontinu était accepté depuis longtemps dans la matière avec l'hypothèse atomique, puis dans la lumière avec le photon, mais on croyait avec Newton et Maxwell que les actions relevaient du continu ; hé bien non ! il n'y a de résultat d'une action que si celle-ci est au moins égale au quantum d'action h , sinon l'action n'a aucun effet et n'est pas détectable.

Cela signifie que pour pouvoir être détectée, un apport d'énergie ΔE doit être appliquée pendant un temps au moins égal à Δt tel que $\Delta E \cdot \Delta t$ soit supérieur à h , sinon cet apport d'énergie n'étant pas détectable ne peut être considéré comme "réel", il est "virtuel". Pendant un temps suffisamment court, l'énergie portée par une particule ne peut pas être définie avec précision.

Cette forme de la relation d'incertitude explique l'effet tunnel, où des électrons lancés contre une barrière de potentiel électrique avec une énergie cinétique trop faible pour la franchir voient pourtant quelques uns d'entre eux réussir à la traverser, en puisant temporairement une énergie supplémentaire dans le principe d'incertitude, comme s'ils perçaient un tunnel pour passer sous la barrière.

Les conséquences de cette forme du principe d'incertitude sont immenses sur le plan pratique technologique, car elle explique le fonctionnement des milliards de composants électroniques à effet tunnel utilisés dans le monde pour nos téléviseurs et nos ordinateurs.

- Parfaitement, Robin ! , mais sur le plan conceptuel qui nous intéresse davantage pour alimenter votre enquête, je pense que tu as remarqué que mis sous cette forme, le principe d'incertitude constitue une négation momentanée du principe de conservation de

²⁷ Fritjof Capra, *Le Tao de la physique* Sand 1992

l'énergie qui conduit à des situations assez paradoxales, car une particule qui n'existe pas encore peut emprunter momentanément une énergie ΔE au "vide" qui l'entoure pour l'investir dans sa propre création, à condition de rendre cette énergie avant le temps $\Delta t = \hbar / \Delta E$, c'est à dire avant que le monde extérieur ne s'aperçoive du viol du principe de conservation de l'énergie.

Ainsi un électron peut puiser de l'énergie dans la relation d'incertitude pour émettre un photon qui n'exige pour sa création que 2,5 électronvolts, mais il doit restituer cette énergie empruntée avant que le monde ne remarque que le principe de conservation de l'énergie est violé, donc il doit réabsorber ce photon ou un de ses frères.

Ces photons ont une durée de vie extrêmement courte, de l'ordre de 10^{-15} seconde ; ils apparaissent et disparaissent sans cesse autour des électrons comme un essaim d'abeilles qui accompagne l'électron dans sa course. Ces photons, dits «virtuels» parce qu'ils ont une durée de vie trop courte pour être observables, n'ont besoin que d'un petit apport énergétique extérieur pour s'échapper et devenir réels.

Lorsque dans un atome, un électron, dont l'énergie de masse vaut environ 500.000 e.V, saute d'une orbite à une autre plus interne, il perd une partie de son énergie qu'il cède à un de ces photons virtuels qui en profite pour devenir réel et s'évader.

L'espace que l'on croit vide est en fait envahi par ces particules fantômes temporaires : paires électron-positon, paires quark-antiquark virtuels qui pourraient devenir réels s'ils n'avaient pas à rembourser à la "banque du vide" l'emprunt d'énergie qu'ils viennent d'y contracter grâce au principe d'incertitude ; les emprunts les plus gros doivent être remboursés le plus rapidement.

Si cette énergie empruntée peut être remboursée par un tiers de l'extérieur, alors l'apparition virtuelle éphémère de ces particules issues du vide peut être convertie en existence réelle. Il suffit pour cela qu'une autre particule, dont l'énergie cinétique a été accrue dans un accélérateur, puisse payer le prix de l'existence en remboursant la banque du vide au prix convenu, c'est à dire au moins la masse au repos de la paire de particules virtuelles ; ce remboursement s'opère en abandonnant à la banque du vide une partie de l'énergie cinétique de la particule ; on peut ainsi avec une énergie d'accélération de 1 MeV créer une paire électron-positon, et pour 1000 MeV une paire proton-antiproton ; la gamme des prix est parallèle à la gamme des masses, mais souvenez-vous que l'achat s'effectue obligatoirement par paires matière-antimatière car on ne peut pas ajouter un seul fermion de matière à l'univers sans y adjoindre son antifermion pour maintenir l'équilibre.

On est là en plein vertige des particules virtuelles : pendant un laps de temps suffisamment court, il existe une incertitude inhérente quant à l'existence ou la non-existence d'une particule. Rien ne peut empêcher un couple de particules d'apparaître à partir de rien et sans cause apparente, puis de se recombinaison et ainsi de disparaître avant que ce phénomène puisse être remarqué, pour autant que certaines règles soient respectées, telles que la conservation de la charge électrique et l'équilibre entre particules et antiparticules. La seule loi qui s'applique dans cette folie chaotique est que l'addition des nombres quantiques doit toujours donner zéro, le zéro du vide.

Un électron et un positon peuvent ainsi apparaître à partir de rien, à condition de disparaître très vite, un proton et un antiproton le peuvent également, à condition de disparaître encore plus vite. Ces tours de passe-passe sont en fait facilités par l'intervention d'un photon dans le premier cas, et d'un méson dans le second, qui apportent un complément d'énergie utile à la dispersion des particules

Comme l'écrit Michel Cassé²⁸ à qui j'emprunte ces analogies pédagogiques: «Le vide est non seulement une banque, mais une agence de communication et de relations publiques ; l'inventaire du moindre centimètre cube d'espace frappe de stupeur : les paires virtuelles électron-positon côtoient toute une faune de quanta-photons, gluons, particules W et Z et bosons de Higgs, on peut s'étonner d'y voir encore à travers. Ces anges microscopiques du vide ne laissent pas la matière indifférente : les légions de particules virtuelles convoquées par le vide mettent en relation et transforment les particules réelles et durables de la matière. Le vide est l'état latent de la nature, le réel, ou réputé tel, en est l'état manifeste».

Heureusement pour notre santé mentale, les seuls fantômes émergeant spontanément du vide pour une apparition fulgurante concernent des particules et antiparticules dites élémentaires, ou faiblement composées comme des protons et antiprotons ; on n'a encore jamais vu sortir d'un chapeau un lapin et un antilapin, mais on ne peut pas jurer que la probabilité d'un tel événement soit totalement nulle pendant une fraction de fraction de fraction de fraction.... de milliardième de milliardième de milliardième....de $10^{-\text{quelques milliers}}$ de seconde, ce qui n'a jamais permis d'en attraper un.

²⁸ Michel Cassé, *Du vide et de la création* Edition Odile Jacob 1993

Cramponnez vous car maintenant le tour de passe-passe va devenir vraiment magique : un photon qui n'existe pas crée une paire electron-positon, qui ensuite s'annihile pour donner naissance au photon se retrouvant à l'origine de leur création ; ne me dites pas que ça ne marche pas parce que j'ai commencé par un photon qui n'existe pas, car souvenez-vous que pour le photon, il n'y a pas de différence entre le passé et l'avenir puisque le temps n'existe pas pour lui, donc le même photon peut servir aux deux bouts de la chaîne temporelle.

- Alors ça ! , c'est encore plus fort que Starwar, dit Noël, il faudrait que je trouve un moyen d'expliquer ça à mon petit frère, mais ça va être dur.

- Le vide est en lui-même un réservoir bouillonnant de particules virtuelles, même en l'absence de particules réelles, et ce sont des fluctuations de ce vide quantique que peuvent surgir des contraires : particules et antiparticules, c'est pourquoi je vous ai dit hier soir que l'idée de l'*Apeiron* d'Anaximandre était très moderne²⁹ puisqu'il avait imaginé cette espèce de vide créateur d'où sortent les contraires nécessaires à la construction du monde.

Robert Feynman a introduit l'idée qu'une antiparticule peut être considérée comme identique à la particule correspondante, mais remontant le cours du temps au lieu de le descendre. L'électron va dans le sens du temps, le positon est un électron qui remonte le temps. Si les contraires des espèces simples se distinguent par leur direction de propagation dans le temps, cela veut dire que dès que le temps a été créé, il a permis de distinguer les opposés qui étaient " préalablement " confondus dans le vide quantique.

Partant de ces liens distendus entre cause et effet, la physique quantique offre une manière subtile d'esquiver le problème de l'origine de l'univers³⁰. Pour certains physiciens quantiques habitués à voir apparaître spontanément et sans cause apparente des objets physiques de taille subatomique, et considérant qu'au moment du Big-Bang, l'univers était lui-même de dimension subatomique, ces physiciens pensent que les phénomènes naturels pouvaient à ces tout premiers instants ressembler à ceux aujourd'hui descriptibles par la physique quantique. Il ne leur semble plus alors nécessaire de faire appel à un acte surnaturel pour créer cet univers qui aurait pu naître spontanément, de la même manière qu'un noyau radioactif se désintègre spontanément.

Cette cosmologie, que l'on peut qualifier d'agnostique, autour des anglais Stephen Hawking, Jim Hartle, Peter Atkins, voit dans la multitude des fluctuations possibles du vide quantique qui auraient préexisté au Big-Bang, des tentatives diverses de création spontanée de structures essayant des nombres variés de dimensions d'espace et de temps, tentatives issues du hasard de ces fluctuations, dont seul l'essai à trois dimensions d'espace et une de temps aurait eu la géométrie convenable pour permettre sa survie et son évolution explosive à partir du Big-Bang³¹.

- Donc la police scientifique anglaise a plutôt tendance à conclure de son enquête qu'il ne s'agissait pas d'un acte délibéré, mais d'un accident, conclut Robin. Mais vous ne nous avez encore pas reparlé de cette non-localité qui provoque des insomnies chez certains physiciens ?

- Non seulement des insomnies chez certains, mais des débats parmi beaucoup, car la physique quantique a ceci de différent, qu'elle existe maintenant depuis bientôt un siècle et suscite pourtant toujours des contradicteurs, alors que toutes les théories physiques précédentes furent acceptées par la totalité des physiciens en moins de cinq ans.

²⁹ Léon Lederman *Une sacrée particule* Odile Jacob 1996

³⁰ Paul Davies *L'esprit de Dieu* p 62 Hachette 1998

³¹ Peter A. Atkins *Comment créer le monde* Seuil 1993

C'est de ces contradicteurs que sont sortis des paradoxes soigneusement élaborés par les tenants d'un rationalisme classique, paradoxes dont la validité a été constamment contestée par les pragmatiques de l'école de Copenhague. Cette contestation dure toujours et si vous avez la curiosité d'explorer l'Internet, vous y découvrirez ces débats sur les grands paradoxes classiques comme EPR ou le chat de Schrödinger ou la boîte à électron de De Broglie, ainsi que sur les diverses expérimentations mises en œuvre pour faire pencher la balance vers l'une ou l'autre des écoles, comme la vérification de l'inégalité de Bell par les expériences d'Alain Aspect et de quelques autres.

Pas très simple d'aborder cette question de la non-localité ! Mais je vais essayer de vous en donner une idée. Remarquons d'abord que l'idée de localité d'un objet est intuitive : si deux objets sont très éloignés l'un de l'autre, nous ne nous attendons pas à ce que l'un puisse avoir une influence forte et rapide sur l'autre ; la non-localité, c'est le contraire, c'est à dire la possibilité pour deux objets séparés par des années-lumière de s'influencer l'un l'autre fortement et instantanément.

Ce sujet de la non-localité est l'aboutissement imprévu des contestations répétées d'Einstein qui détestait la physique quantique pour son incertitude et son manque de causalité, et ne pensait pas qu'elle puisse prétendre à être une description acceptable du monde réel. Il espérait pouvoir la prendre en défaut et se comportait vis à vis d'elle comme le gamin sans complexe qui perturbe le cours de catéchisme en posant au prêtre des colles de logique du genre : si Dieu est tout puissant, peut-il créer un roc si lourd qu'il ne puisse pas le soulever ?

Avec deux comparses du même esprit, Podolsky et Rosen, ils imaginèrent une "expérience de pensée" destinée à démontrer que le principe d'incertitude d'Heisenberg pouvait être contourné, donc que la théorie quantique était prise en défaut et incomplète. Les contestataires suggéraient l'existence de "variables cachées" que l'on découvrirait un jour et qui nous masquent actuellement le déterminisme intrinsèque de la nature en nous laissant croire à des actions dues au hasard et à des incertitudes. Cette contestation est connue sous le nom du "paradoxe EPR", qui n'a rien à voir avec un réacteur nucléaire, mais représente seulement les initiales de ses auteurs.

Ils fondèrent leur raisonnement sur les lois de conservation rigoureuses de certaines grandeurs, qui régissent sans contestation possible les interactions entre particules ; je ne vous décrirai pas le paradoxe EPR sous sa forme initiale assez abstraite, mais sur un exemple plus parlant : partons d'un méson π (ou Pion) au repos, sans vitesse ni moment angulaire, qui se désintègre en émettant deux photons ; le respect des lois de conservation de la quantité de mouvement et du moment angulaire impose que l'ensemble des deux photons A et B ne doit avoir, lui non plus, ni vitesse ni moment angulaire, ce qui signifie que les deux photons doivent se séparer au point de désintégration avec des vitesses égales et opposées, et avoir aussi des spins opposés.

Or le spin est une grandeur discontinue vectorielle, du genre $+0.5\vec{h}$ ou $-0.5\vec{h}$, et le principe d'incertitude, qui s'exprime en unités de h , s'applique à chaque composante du vecteur spin sur un référentiel donné, puisque chacune a la dimension de h , ce qui veut dire que si on détermine avec certitude une seule des composantes, les deux autres seront indéterminées. On ne peut connaître avec certitude qu'une seule composante du spin.

Mais pourtant, contestèrent EPR, si on mesure le spin du photon A et qu'on lui trouve une composante positive sur l'axe x d'un référentiel quelconque, on peut logiquement en conclure instantanément et sans mesure que la composante du spin du photon B sera égale et de sens inverse sur ce même axe. Si maintenant on mesure le spin du photon B et qu'on lui trouve une composante positive sur l'axe y , on pourra de la même manière conclure que la composante du spin de A sur y sera négative, donc nous pouvons par cette procédure connaître rigoureusement deux composantes x et y du spin d'un photon, ce qui est pourtant interdit par votre principe d'incertitude qui impose de n'en pouvoir connaître qu'une seule. Donc votre théorie quantique a des faiblesses !

A ce raisonnement apparemment de bon sens, qui est celui de la logique classique, les prêtres de l'école de Copenhague répondent : le principe d'incertitude est incontournable, ce qui veut dire que la mesure faite sur A, qui permet de déduire une conclusion sur une composante du spin de B, interdit à partir du moment où cette mesure est faite de connaître une autre composante du spin de B.

Attention à ce que vous dites, répondent à leur tour EPR, vous dites en somme que la mesure faite sur A pollue instantanément toute mesure ultérieure sur B, quelle que soit la distance entre les deux photons, qui entre temps ont filé dans des directions opposées à la vitesse de la lumière. Cela signifie que la particule B est informée instantanément de la mesure faite sur la composante x du spin de A pour adapter son comportement et rendre imprécise toute mesure ultérieure faite sur les composantes y ou z de son spin. Instantanément veut dire plus vite que la vitesse de la lumière ! Nous, on ne sait pas faire, car la théorie de la relativité l'interdit, ce n'est pas sérieux.

Il vous reste donc deux solutions ! messieurs de Copenhague, ou bien vous maintenez votre foi dans votre théorie quantique à son stade actuel de développement et vous acceptez de vivre avec cette négation flagrante de la théorie de la relativité qu'il n'est pourtant plus question de remettre en doute, ou bien vous admettez que la description quantique de la désintégration d'un pion en deux photons est incomplète, que chaque photon emporte probablement avec lui d'autres informations, des "variables cachées" qui seront découvertes plus tard et qui expliqueront le phénomène.

Cette colle était une "expérience de pensée", mais en 1964, John Bell proposa un schéma de mesure qui permettrait d'en faire une vérification expérimentale basée sur une inégalité pour déterminer si oui ou non il y a quelque part des variables cachées. Si les mesures vérifiaient cette inégalité, il y aurait des variables cachées. Si l'inégalité était au contraire violée, il n'y en aurait pas, et il faudrait admettre que Einstein et ses collègues avaient tort et que les prêtres de Copenhague avaient raison.

Dans les décennies 70 et 80, des labos du monde entier se sont lancés dans des expériences plus imaginatives les unes que les autres pour tester cette inégalité de Bell, les uns avec des photons visibles polarisés, les autres avec des rayons gamma, d'autres encore avec des protons ; la grande majorité des résultats, dont l'expérience d'Alain Aspect, de l'institut d'optique d'Orsay en 1982, qui a semblé à l'époque la plus convaincante à la communauté scientifique, ont donné l'avantage à l'école de Copenhague !

Alors il faut admettre que des liaisons d'information instantanées existeraient entre des particules ayant préalablement interagi, mais pouvant être maintenant à des années-lumière de distance !!! Puisque toutes les particules de l'univers ont été intimement liées entre elles à l'instant du Big-Bang, rien n'interdit de penser que chaque particule de chaque étoile ou galaxie "connaît" l'existence de toute autre particule de l'univers et garde avec elle des relations "instantanées", "supraluminales".

C'est la conclusion un peu désespérée qu'en tirent les scientifiques du type EPR.

Les pragmatiques iconoclastes de Copenhague, eux, se contentent de dire que le principe d'incertitude est inviolable et que c'est comme ça ! Si des réactions simultanées de deux particules séparées par des années lumières vous gênent, peut-être faut-il revoir le concept d'espace parce que la séparation spatiale des objets n'est sans doute qu'un mode de notre sensibilité ? Le concept de globalité holistique des phénomènes n'est pas aisément assimilable par nos esprits occidentaux habitués depuis les philosophes grecs à concevoir le monde en entités individuelles séparées, définies seulement par leurs propriétés intrinsèques, alors que si vous acceptez de considérer que la réalité est holistique, il n'y a plus de paradoxe : les photons A et B font parties de la même réalité globale, indépendante de la distance entre A et B, éliminant le concept de localisation ; c'est cela qu'ils appellent "revoir le concept d'espace".

- Vraiment, professeur, vous vous ingéniez à saper notre enquête en détruisant tous les indices un peu solides, personnellement je décroche car je retrouve dans ces prétendues explications ce que je n'aime pas dans la philo, et j'ai des fourmis dans les pieds, opina Robin.

- Oui, le temps passe et le brouillard s'éclaircit, acquiesça Kirgard, nous devons quitter la physique quantique sans pouvoir conclure que son propre brouillard s'atténue. La meilleure conclusion que l'on puisse en donner est peut-être celle de Sven Ortoli et Jean-Pierre Pharabod dans *le cantique des quantiques*³² :

Une poule couve dix œufs. Un gamin facétieux remplace en cachette un de ces œufs par un œuf de cane. Lorsque les œufs éclosent, la poule est bien forcée de s'apercevoir que l'un de ses poussins n'est pas du tout comme les autres. Elle a alors le choix entre trois attitudes :

- *Elle peut s'efforcer de repousser le caneton à coups de bec ; c'est ce que font tous ceux qui essaient de remplacer la physique quantique par une autre théorie.*
- *Elle peut décréter : «c'est un poussin», et ignorer superbement sa différence. C'est ce que font les physiciens qui déclarent que rien ne s'est passé, qu'il suffit de "penser la non-localité".*

³² Sven Ortoli/Jean-Pierre Pharabod, *Le cantique des quantiques*, La Découverte 1998.

- *Elle peut enfin reconnaître que ce poussin n'est pas du tout comme les autres, mais l'adopter quand même. Elle dit alors : «il est vraiment différent des autres, je ne comprends pas pourquoi, mais il est là et je le garde».*

- En somme, fit remarquer Noël, la physique quantique a révélé les insuffisances de la physique classique, tout comme le pendule de Foucault accroché à la voûte du Panthéon, dont le plan d'oscillation tournant au fil des heures démontrait que la Terre tournait bien sur elle-même, ce à quoi se limitait Foucault qui considéra que le plan d'oscillation du pendule restait fixe pendant que la Terre tournait ; mais fixe par rapport à quoi ? J'ai lu que les physiciens qui ont repris cette expérience avec une précision croissante constatent que le plan de lancement du pendule dérive lentement et si on prolongeait très longtemps l'expérience ne reste fixe ni par rapport au soleil, ni par rapport aux plus proches étoiles, ni par rapport aux plus proches galaxies, mais plutôt par rapport aux amas de galaxies les plus lointains, situés à des milliards d'années-lumière, qui constituent l'essentiel de la masse de l'univers³³. Là encore on observe un lien avec ce qui est très loin, qui à ma connaissance n'est pas plus expliqué par les lois actuelles de la physique que le paradoxe EPR.

- Il est probable, conclut Kirgard, que la physique reste ouverte à d'autres évolutions dans l'avenir puisque cette réflexion dure depuis plus de 2300 ans, car tu te souviens peut-être que c'est Epicure qui a le premier laissé quelques traces d'intuitions un peu parentes de la physique quantique avec son concept de "clinamen", repris plus tard par Lucrèce : "Tandis que, dans le vide, les atomes tombent tout droit sous l'effet de leur poids, il leur arrive, on ne saurait dire où ni quand, de s'écarter un peu de la verticale, si peu qu'à peine on peut parler de déclinaison (clinamen). Sans cet écart ils ne cesseraient de tomber à travers le vide immense, comme des gouttes de pluie ; il n'y aurait point lieu à rencontres, à chocs, et jamais la nature n'aurait rien pu créer.A la rectitude des allers-retours, à ces déplacements disciplinés succède le tumulte de formes passagères qui élaborent d'autres façons d'habiter l'espace et auxquelles participe la lumière. Si toujours d'un premier naissait un second suivant un ordre rigoureux, si par leur clinamen les atomes ne provoquaient pas un mouvement qui rompe les lois de la fatalité, et qui empêche que les causes ne se succèdent à l'infini, d'où viendrait donc cette liberté accordée sur terre aux êtres vivants ; d'où viendrait, dis-je, cette libre faculté arrachée au destin, qui nous fait aller partout où la volonté nous mène ?"

. Les scientifiques de l'école Einstein, qui acceptent mal le concept de non-séparabilité, épiluchent encore avec soin toutes les conditions expérimentales et logiques qui ont pu conduire aux conclusions actuelles en espérant y trouver des failles, par une analyse critique des étapes logiques du raisonnement dans l'expérience d'Aspect, aussi bien que des subtilités du raisonnement de Bell.

L'enquête est nettement plus compliquée qu'il n'y paraissait, et on recherche des détectives à l'esprit affûté, à la logique acérée et ne détestant pas la philosophie et les grandes remises en cause pour faire carrière sur ce sujet, mais attention, il faut n'avoir pas plus froid aux yeux que Einstein lorsqu'il inventa la Relativité pour oser remettre en cause des notions profondément ancrées dans notre esprit par notre culture occidentale, et il faut savoir aussi qu'à ce jour tous les scientifiques s'y sont cassés les dents et que la théorie quantique n'a jamais été prise en défaut. Si cela vous intéresse ?

³³ Matthieu Ricard, Trinh Xuan Thuan *L'infini dans la paume de la main* p102 Fayard 2000

6

Reprenons nos forces

Le petit déjeuner prolongé se terminait ; dans le ciel pâle, on apercevait maintenant le disque flou du soleil à travers la brume qui commençait à s'évaporer lentement, laissant l'herbe sèche.

- Ce n'est pas bon signe, remarqua Robin, quand le brouillard remonte sans déposer de rosée, l'orage n'est pas très loin, j'espère qu'on pourra quand même passer la journée sans douche ; ce soir, ce serait moins gênant puisqu'on couche au refuge pour notre dernière nuit. Entre temps, vous vous souviendrez que nous n'avons plus beaucoup de provisions et qu'il nous faudra redescendre dans la journée pour recharger nos sacs si nous voulons manger demain.

Les tentes repliées en quelques minutes, le groupe se mit en route en silence ; ils devaient longer le lac sur les premières centaines de mètres avant de s'engager sur un sentier traversant la crête pour atteindre le plateau en contrebas. A l'endroit où ils allaient quitter le bord de l'eau, ils crurent apercevoir des ombres furtives dans la brume ; ils stoppèrent leur marche sans bruit : à une cinquantaine de pas, une dizaine de chamois se désaltéraient et gambadaient ; la marche silencieuse dans la brume ne les avait pas alertés et ils continuèrent leurs ébats quelques instants avant de flairer leur présence et de détalier vers le pierrier qui dominait cette partie du lac.

Après le franchissement de la crête, un parcours en lacets les fit descendre en une heure de marche facile sur un vaste plateau qui leur offrit un immense horizon fermé au loin par une nouvelle chaîne de sommets dentelés, mais sous leurs pieds, le terrain avait changé : ce n'étaient plus que dalles de calcaire blanc crevassées de fissures, épineux rabougris, tronc tordus de petits pins et buissons desséchés.

Dans ce décor austère où le chemin était à peine tracé, ils découvraient des beautés secrètes : ici de larges plaques d'edelweiss étalaient le duvet de leurs fleurs argentées, là des petites touffes de gentianes bleues étaient encore en fleurs à l'ombre des genévriers, et partout la végétation rase était émaillée de taches de couleurs vives entre les grandes dalles de calcaire.

Ils longèrent quelques avens profonds, qu'on appelait ici des chourins. C'était un plateau sauvage où l'on pouvait imaginer des lièvres se régaler de serpolet dans les premiers rayons du soleil ; ce n'était pas de la montagne à vache aux grandes herbes fleuries, seuls les moutons pouvaient s'y nourrir, et ils en croisèrent un troupeau paisible, sans berger ni chiens ; s'ils existaient, peut-être étaient-ils assoupis à l'ombre rare d'un buisson, car la température avait beaucoup monté, en partie par la baisse d'altitude, en partie avec l'avancement de la journée, mais surtout parce que le temps changeait manifestement, de lourds cumulus naissaient dans le ciel d'un bleu profond où le brouillard du matin n'était plus qu'un souvenir.

Après une longue traversée de ce terrain dépouillé, ils en atteignirent la rive Est où la falaise qui bordait le plateau de ce côté leur découvrit en quelques mètres le vaste paysage étalé à leurs pieds : une grande vallée avec ses villages parsemés du nord au sud et la route qui serpentait de l'un à l'autre. Il leur fallait maintenant descendre dans le plus gros bourg où ils pourraient trouver à se ravitailler.

- Me permettez-vous un petit arrêt avant de descendre, proposa Grisella, par cette chaleur, je me sens sans forces.

Les sacs à dos tombèrent à terre et ils s'affalèrent à l'ombre maigre d'un bosquet de genévriers.

- Si tu déjeunais avec autre chose qu'un verre de grenadine, tu aurais peut-être encore des forces à onze heures, tu devrais plutôt essayer Banania, grogna Robin en lui offrant du chocolat, des bananes séchées et du lait condensé sortis de son sac.

- Ce n'est pas ma faute si je ne peux rien avaler au réveil. Merci Robin, je vais juste croquer un peu de chocolat, et boire encore de la grenadine.

Les trois autres sortirent aussi leurs gourdes et burent à grandes goulées.

- On peut vider nos gourdes puisqu'on va se ravitailler au village tout à l'heure, dit Noël ; et pendant que Grisella qui se dit sans forces récupère les siennes, on pourrait peut-être parler de ces forces, puisqu'on tourne autour depuis quelques séances sans vraiment les aborder, et que le professeur Kirgard nous a laissé entendre qu'il n'était plus très sûr de savoir ce que c'était.

- Cela semble a priori le sujet le moins spéculatif qui puisse être, bougonna Robin ; si vous faites un sondage dans la rue en demandant aux sondés de vous parler de l'espace ou du temps, vous trouverez bien quelques apprentis philosophes inspirés qui vous débiteront un quart d'heure de fadaïses les yeux mi-clos (ne prenez pas cela pour de l'autocritique de groupe), mais si vous leur demandez de parler de la force, je pense que la plupart réagiront avec surprise devant une question aussi terre à terre : « ben quoi, la force, c'est la force, c'est ce qui fait bouger ! » Dans le meilleur des cas, vous tomberez sur un gars qui se souvient de Newton qui a reçu une pomme sur la tête et du $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ de ses années de potache, et qui vous dira après une sage réflexion : « \vec{a} , c'est une accélération, donc la force, c'est ce qui modifie le mouvement d'un corps de masse m et qui fait passer la pomme de l'immobilité sur sa tige à son impact sur la tête de Newton ». C'est déjà nettement mieux, mais il vaut mieux ne pas trop demander ce que c'est que le ce.

- Ce que c'est que le ce ! dis donc, Robin, tu te mets à parler comme un philosophe, raila Noël.

- Oui, parce qu'on a là un bel exemple d'une abstraction à laquelle tout le monde s'est tellement habitué que plus personne ne pense que la force est une abstraction. L'accélération \vec{a} n'en est pas une, parce qu'une vitesse, on voit bien ce que c'est, et un changement de vitesse aussi. La masse m , c'est déjà plus délicat, mais on perçoit que c'est une propriété liée à la matière, qui mesure la réponse d'un objet qui subit une force ; plus m est grand, plus la réponse de l'objet à une force donnée est faible, c'est la masse "inertielle", c'est plus dur de pousser ma voiture en panne que mon vélo. Mais la force, c'est quoi ? Si on redit que c'est l'agent responsable de la modification du mouvement, cette loi de Newton reste-t-elle une loi ou simplement une définition de la force ? On tourne un peu en rond car en fait c'est les deux à la fois : c'est la définition abstraite du ce qui modifie le mouvement et c'est aussi la loi de modification, mais on ne sait toujours pas ce que c'est que le ce.

- On peut légitimement se poser la question, intervint Kirgard, Descartes avait chassé la notion de force, et Newton l'a réintroduite.

- Robin reprit : à l'époque de Newton, on n'appréhendait qu'une seule nature de ce ce : la gravité qui faisait tomber les pommes et se balancer les pendules ; mais quand la pomme

est tombée par terre, elle ne bouge plus, cela veut dire qu'elle n'est plus soumise à aucune force, pourtant la force de gravité s'exerce toujours sur elle ; oui, mais il y a le sol sur lequel elle repose, donc cela veut dire que le sol exerce sur la pomme une force égale et opposée à celle de la gravité. C'est une seconde loi de Newton : lorsqu'un corps est au repos, la réaction est égale et opposée à l'action, la réaction du sol est égale et opposée à l'action de la gravité sur la pomme, de même qu'avant de tomber, la réaction de la tige qui suspendait la pomme avant de casser était égale et opposée à l'action de la gravité.

- Dis donc, Robin ! , tu es en train de nous ressasser le cours de physique élémentaire ! dit Grisella, c'est pour nous reposer des vertiges de la physique quantique ?

- Attends un peu ! , ce à quoi je voulais en venir, c'est que pour Newton, une force est une force, qu'elle soit d'action ou de réaction, mais a-t-il jamais soupçonné qu'elles pouvaient être de nature physique totalement différentes, que la force de réaction du sol et de la tige de pomme était une force électrique, qu'il ne connaissait pas à l'époque? S'il l'avait su, cela lui aurait ouvert des horizons sur l'énormité de la force électrique par rapport à la force de gravité puisqu'il suffit des attractions électriques entre les molécules des quelques millimètres carrés de section de queue de pomme pour retenir cette pomme contre la force d'attraction de tout notre globe terrestre sur lequel est planté le pommier.

- Puisque vous comparez les différents types de forces, ce serait peut-être le moment de les situer toutes les quatre, intervint Kirgard ; le meilleur moyen est peut-être de considérer deux protons très proches l'un de l'autre, puisque c'est une particule sensible à chacune des quatre forces.

- ◆ On prend arbitrairement comme unité la force forte qui est la plus grande.
- ◆ La force électrique est plus de 100 fois plus faible.
- ◆ La force faible est d'environ un cent millième.
- ◆ Il n'existe qu'une seule autre force qui soit encore plus faible que la force faible, c'est la force de gravitation, qui se situe vers 10^{-40} fois en dessous de la force forte. Je vous rappelle en passant la grande faiblesse de la constante G de la loi d'attraction universelle : $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}\cdot\text{s}^2$.

Robin qui se réfère souvent à ses sens va peut-être nous dire que la gravité est pourtant la seule force dont son corps a ressenti les effets en grimpant ces montagnes, c'est parce que c'est la seule qui s'exerce sur toute matière et que son effet est cumulatif sur les milliards de milliards d'atomes de matière dont nos corps sont faits, c'est une force macro, et non pas intra-atomique. Comme il y a beaucoup d'atomes dans votre corps et beaucoup plus encore dans la terre, vous vous apercevez que cette force existe, et comme il y en a encore beaucoup plus dans le soleil, la terre elle-même est attirée par le soleil et tomberait dessus si elle ne tournait pas autour, et nous tous avec elle, à la vitesse de 30 kilomètres par seconde.

Ce qui est aussi important que les ordres de grandeur relatifs de ces quatre forces est leurs portées respectives. Seules les forces gravitationnelles et électriques ont une portée infinie, mais bien sûr avec une intensité qui décroît comme le carré de la distance. La force électrique pourrait donc être aussi une force macro puisque son rayon d'action est infini, et comme elle est beaucoup plus intense que la gravitation, elle pourrait prétendre à dominer le monde ; La seule raison pour laquelle les forces électriques ne dominent pas l'univers est que presque partout les charges électriques positives et négatives sont en équilibre, donc sauf pendant les orages où cet équilibre est momentanément rompu, la force électrique n'a pas de pouvoir global sur le monde macroscopique qui est pratiquement neutre, mais vous savez bien qu'elle a sa domination secrète sur la cohésion de la matière et sur toute la chimie.

Les forces forte et faible ont au contraire des rayons d'action très courts que je vous ai cités hier soir : respectivement 10^{-13} et 10^{-16} cm, avec des lois complexes de variation en fonction de la distance.

La force forte, mise en œuvre par des gluons de 8 sortes, manifeste la loi la plus bizarre : pour des distances extrêmement courtes, elle est très faible, permettant aux quarks qu'elle relie à l'intérieur du noyau de jouir d'une apparente liberté de mouvement tant qu'ils restent très proches, mais s'ils s'éloignent l'un de l'autre tout en restant à l'intérieur du nucléon, la force de rappel devient vite énorme ; ce comportement de la force forte est exactement le contraire de celui de la force électrique qui s'amollit avec l'éloignement . Cette forme de loi étrange confère aux quarks cette liberté dite "asymptotique" qu'ils manifestent à l'intérieur des nucléons où ils tournoient à des vitesses prodigieuses, mais si on tente de séparer des quarks, l'énergie nécessaire pour accroître la distance entre eux augmente si rapidement que bien avant que les quarks puissent être séparés, l'apport d'énergie provoque la création d'une nouvelle paire quark-antiquark.

Si on prend en compte ces rayons d'action, on constate qu'à l'extérieur d'un atome, il n'y a plus de force forte parce que sa portée est trop courte, plus de force électrique puisque l'atome est neutre, et plus de force faible parce que sa portée est plus courte encore, mais il y a toujours la force de gravitation qui est proportionnelle au nombre d'atomes accumulés dans un corps.

C'est le moment d'avoir une pensée attristée pour ce pauvre Newton qui ne connaissait qu'une seule de ces quatre forces, la gravitation, sur laquelle il a bâti toute sa gloire il y a seulement 300 ans.

- Le coup de génie de Newton, reprit Robin, c'est que quelle que soit la nature physique de la force, la loi d'action sur les masses $f = m.a$ reste la même. Il ne l'a pas fait exprès puisqu'il ignorait qu'il y en avait plus d'une, mais on sait maintenant que la force électrique qui s'exerce sur un électron de masse m l'accélère suivant la même loi.

Le terme de force présente donc bien le caractère d'un modèle mathématique puisqu'il correspond à des réalités physiques multiples : l'une agit sur toute la matière qui existe, c'est la gravité, l'autre uniquement sur la matière électrisée, c'est la force électrique ; seules ces deux là étaient connues avant 1930, puis une autre est venue s'ajouter, qui agit seulement sur les trucs du genre proton, neutron et quarks, c'est la force forte, et la petite dernière enfin, la faible, qui agit à l'intérieur des quarks ! A chacun son **ce**, qui reste d'ailleurs aussi abstrait quand on en a dénombré quatre que lorsqu'on ne connaissait que le seul **ce** de la gravité.

Si on veut soulever un peu le voile du **ce**, c'est là que le professeur nous sort ses bosons : Les photons pour la force électrique, les gluons pour la force forte, les bosons intermédiaires W et Z pour la force faible et les gravitons dont il n'a rien dit pour la gravitation, qui restent l'abstraction suprême puisqu'on a identifié tous les autres au vingtième siècle, mais que ceux-là restent au menu du vingt et unième.

- Moi aussi je trouve ça génial, cette abstraction de la force, opina Noël, cela évite d'avoir à se préoccuper du mécanisme intime de la création de ces forces, c'est un peu semblable aux grandeurs de synthèse de la thermodynamique comme la pression ou la température, qui rendent compte globalement du comportement agité des molécules, sans que l'on ait à se soucier de calculer le comportement de chacune d'elle, ce qu'on ne saurait pas faire. Et Newton n'a pas eu besoin de se préoccuper du graviton pour énoncer sa fameuse loi de l'attraction universelle $f = g.m.m'/r^2$, qui lui a permis d'expliquer pourquoi les pommes tombaient et les planètes tournaient.

Tiens, puisque c'est la récréation, on peut s'amuser un peu : avez vous déjà pris conscience que cette force d'attraction universelle est mutuelle entre la pomme et la terre, et que les deux se dirigent donc l'une vers l'autre ? La terre monte donc un peu vers la pomme pendant que la pomme tombe ; évidemment personne ne s'en est jamais aperçu à cause de l'énorme différence des masses et aussi parce pendant qu'il tombe des pommes en

Normandie, il en tombe aussi de l'autre côté en Nouvelle Zélande, ou des fruits équivalents si ce n'est pas la saison des pommes.

- C'est amusant et juste, dit Kirgard ; en tout cas, cette loi de la gravitation universelle qui explique non seulement que les pommes tombent quand elles sont mûres, mais aussi pourquoi et comment les planètes tournent autour du soleil, nous fait prendre conscience que l'évolution de la science est fortement influencée par l'ambiance culturelle : Dans le monde croyant de l'époque de Newton, personne n'a été gêné par l'idée que cette force d'attraction universelle semblait s'exercer instantanément et à distance, qu'un objet comme une étoile dont la lumière, qui voyage pourtant vite, a mis des millions d'années à nous parvenir, puisse avoir une action gravitationnelle instantanée sur la terre. Quand je dis que personne n'était gêné, je devrais pour être juste en excepter Newton lui-même qui prenait la précaution d'écrire : « tout se passe comme si... , je ne forge pas d'hypothèse pour expliquer comment une force s'exerce à distance ».

C'était déjà une croyance à la non-localité, mais qui ne choquait personne à l'époque, alors qu'aujourd'hui les savants se mobilisent pour inventer des expériences tordues afin d'essayer de prouver que cette non-localité que la physique quantique semble nous imposer ne peut pas vraiment en être une, parce que les physiciens modernes ne parviennent plus vraiment à admettre cette idée qui a gâché la fin de la vie d'Einstein !

L'abstraction de la force a un peu changé de forme deux siècles après Newton. L'idée de base du plein et du vide de Démocrite et de Newton, c'est à dire de vide dans lequel des corps solides exercent entre eux cette force d'attraction, fut modifiée par Faraday et Maxwell qui travaillaient sur la force électrique, et préférèrent parler de "champ" : Au lieu d'évoquer une attraction mutuelle de deux charges électriques + et - , ils trouvèrent plus juste de dire que chaque charge produit une "perturbation" de l'espace environnant, qui n'est plus vraiment "vide", mais porteur de cette perturbation telle que l'autre charge, lorsqu'elle est présente, éprouve une force. Ce conditionnement de l'espace qui a la potentialité de produire une force fut appelé champ ; lorsqu'il est créé par une charge, le champ existe en soi, que l'on y introduise ou non une autre charge. Vous voyez la différence de concept ?

- Oui ! , on voit très bien cette nouvelle abstraction à la mode, dit Grisella entre deux carrés de chocolat, mais personnellement je préférerais que l'on essaie de soulever un peu le voile du **ce**, je suppose que c'est vous le mieux placé pour le faire.

- Tu crois vraiment que cela vaut la peine de remplacer une abstraction par d'autres encore plus à la mode ? répondit Kirgard d'un ton désabusé ; il me semble que je vous ai soulevé un petit coin du voile hier soir en vous donnant la liste des 13 bosons et sur quoi ils agissent.

- Certes ! , mais ça ne nous a pas beaucoup ouvert les yeux sur le mécanisme, vous nous avez dit par exemple que le photon était l'agent de la force électrique, mais comment l'agent travaille-t-il ? Robin vient de nous rappeler que sa pomme avant de tomber était retenue par les forces électriques de cohésion moléculaire de sa queue, et après sa chute, repoussée par le sol par les forces électriques de répulsion du sol, comment ça marche dans le détail ?

- Vous allez encore m'accuser d'introduire un nouveau faux nez dans votre enquête, après ceux du temps, de l'espace et de la matière, voilà celui des forces, que l'on a effleuré hier à l'occasion du principe d'exclusion de Pauli ; je crois vous avoir dit que si on essaie de mettre deux électrons de même état quantique au même endroit, une force électrique de répulsion colossale s'y oppose et que c'était là la raison qui nous empêchait de passer à travers les murs. Ma gourde que je pose sur la paume de ma main n'y pénètre pas parce que les électrons périphériques de ma peau repoussent les électrons périphériques du métal de la gourde.

Le problème revient donc à comprendre pourquoi deux électrons se repoussent. Pour cela, on utilise de vagues analogies qui ne servent qu'à faire image et qu'il faut oublier

aussitôt car elles restent tout de même assez loin de la réalité : imaginez un couple de patineurs glissant côte à côte en se rapprochant un peu l'un de l'autre ; s'ils commencent à se lancer des balles qu'ils attrapent à tour de rôle, la loi de conservation des quantités de mouvement fait que leur rapprochement va être freiné progressivement, puis ils vont s'éloigner l'un de l'autre. Pour un observateur trop distant pour apercevoir les balles échangées, il pensera que les patineurs subissent une force de répulsion qui fait diverger leurs trajectoires.

Remplacez les patineurs par des électrons et les balles échangées par des photons, qui ont, souvenez-vous, une quantité de mouvement $p=h/\lambda$ suffisante pour bousculer des électrons, et vous avez une image de ce que peut être ce **ce**, qu'on appelle force de répulsion des électrons, et qui s'opère en fait par un échange de photons.

- L'image marche pour deux charges de même nom qui se repoussent, remarqua Noël, mais si les deux patineurs sont de charges électriques opposées comme un électron et un positon, ils doivent s'attirer et je ne vois pas très bien quels genres de balles ils peuvent échanger pour se rapprocher ? Des balles de masse négative ? Ou des boomerangs qui les font se rapprocher, puis se fracasser l'un contre l'autre ?

- N'en demandez pas trop aux images, je vous ai prévenu que l'on ne manipulait que des images ; je crois qu'il vaut mieux arrêter avant qu'elles ne deviennent idiotes.

Revenons donc un peu plus près de la réalité physique, je vous ai dit au petit déjeuner que les particules réelles se déplacent en étant entourées d'un nuage de particules virtuelles qui tirent leur existence très provisoire du principe d'incertitude, en empruntant une énergie ΔE au vide, et vivent pendant un temps $\Delta t = h / \Delta E$.

Les électrons sont entourés de photons virtuels qui sont des particules de faible énergie et n'ont donc pas besoin d'emprunter beaucoup d'énergie au vide pour exister, donc ces photons vivent assez longtemps et peuvent aller assez loin avant d'avoir à rembourser ΔE puisqu'ils voyagent vite.

Si vous vous souvenez maintenant que l'énergie d'un photon est égale à $h.f$, vous comprendrez que les photons de plus haute fréquence, donc de haute énergie, restent au centre du nuage car ils vivent moins longtemps et n'ont pas le temps de s'éloigner beaucoup avant de devoir être réabsorbés par l'électron, alors que les photons de plus basse fréquence volent à la périphérie du nuage puisqu'ils disposent de plus de temps pour s'éloigner avant de revenir se faire absorber.

Deux électrons qui suivent des trajectoires convergentes voient leurs nuages de photons virtuels interférer progressivement, certains des photons les plus éloignés de leur électron vont se faire capter par l'autre qui remboursera l'énergie empruntée et recevra des petits chocs de quantité de mouvement qui le dévieront de sa route, de très petits chocs d'abord parce que ce sont des photons éloignés de leur base, donc de faible énergie, puis au fur et à mesure que les deux électrons vont se rapprocher, leurs nuages respectifs vont interférer, avec un nombre de photons échangés de plus en plus élevé et des photons de plus en plus énergétiques, freinant de plus en plus les deux électrons, puis les repoussant. Voilà comment, semble-t-il, le **ce** que nous appelons abstraitement une force est en réalité un échange de particules virtuelles.

La force forte fonctionne sur le même scénario : les particules lourdes comme les protons et les neutrons sont enveloppées d'un nuage de particules virtuelles lourdes, comme les mésons, constituées d'un quark et d'un antiquark, qui ont une durée de vie très courte, car leur masse m étant élevée, ils doivent emprunter au vide une énergie plus grande ; leur rayon d'action r est réduit par cette courte durée de vie et répond à la relation $r = h / m.c$, ils ne vont donc pas très loin et ce nuage étroit ne peut interférer avec un autre nuage semblable que si les protons et neutrons sont très proches l'un de l'autre ; cela explique la très courte portée de 10^{-13} cm et l'énorme intensité de cette force puisque les particules virtuelles échangées sont des mésons de l'ordre de 10 millions d'électronvolts au lieu de photons de quelques électronvolts.

Au niveau des quarks constituant l'intérieur des protons et neutrons, on n'a plus affaire à des forces qui tirent ou qui poussent, mais plutôt à des changements d'espèces, et il vaut mieux parler d'interactions que de forces.

Ces interactions ont comme effet direct de modifier la couleur des quarks et sont véhiculées par huit gluons différents, chacun porteur d'une couleur et d'une anticouleur ; la couleur est celle perdue par le quark qui émet le gluon, qui reçoit à sa place l'anticouleur, et vice versa pour le quark receveur, par exemple un quark u rouge qui émet un gluon rouge-antiverd en direction d'un quark d vert perd son rouge et devient u vert, alors que le d vert devient d rouge.

- Dire que je comprends serait trop dire ! grogna Robin.

- Je vous ai prévenu qu'on allait remplacer une abstraction par d'autres ! Vous l'avez voulu ; les coupables se cachent bien et se déguisent comme le Duc de Guise en bec de gaz, dirait Jacques Prévert, il est évident que ces tentatives de représentation verbale ne visent qu'à imaginer très approximativement un ensemble d'équations complexes. Ce nouveau jeu, inventé par Gell-Mann s'appelle la chromodynamique quantique.

Alors terminons vite par la force faible, qui est encore plus complexe dans son approche : elle agit par des bosons très lourds qui se nomment W et Z , ou bosons intermédiaires, qui pèsent respectivement 81 et 93 GeV, donc ont des durées de vie extrêmement brèves, de l'ordre de 10^{-24} seconde, avec des rayons d'action inférieurs à 10^{-16} cm . A l'intérieur des nucléons, les

bosons W changent la saveur des quarks, comme les gluons en changeant la couleur. Comment ? Là encore, il faut faire appel aux nuages de particules virtuelles. Les quarks sont en permanence environnés de nuages de toutes sortes de particules virtuelles qui peuvent interférer avec des particules réelles passant à leur portée ; comme ces quarks sont sensibles à toutes les espèces de forces, ils échangent des photons et des bosons W et Z avec des leptons de passage, et des gluons avec les quarks voisins. Sans arrêt, les quarks d'un proton ou d'un neutron échangent des gluons et changent de couleur, la couleur globale restant blanche, assurant la stabilité du baryon, au moins tant que la force faible ne s'en mêle pas.

Si un neutrino de passage, qui traverse pratiquement toute matière, parvient très exceptionnellement à s'approcher d'un quark à une distance inférieure à 10^{-16} cm, il peut y avoir échange de boson intermédiaire et changement de saveur du quark, c'est à dire transmutation entre proton et neutron, si on ne parle que des particules de notre monde actuel.

L'interaction faible joue surtout un rôle destructeur, c'est le grand désintégrateur de la matière. Hier soir nous avons passé en revue toutes les particules qui n'existent plus actuellement et que l'on reconstitue dans les grands laboratoires de physique pour des apparitions de très courte durée de vie car elles sont instables. Vous vous souvenez que le neutron udd est instable lorsqu'il est isolé, et se désintègre en une dizaine de minutes en un proton uud , en émettant un électron et un antineutrino ; toutes ces désintégrations sont l'œuvre de l'interaction faible.

Vous pouvez entrer plus finement dans le processus de désintégration du neutron par changement de saveur d'un de ses quarks en l'écrivant de plusieurs manières et en mettant en exposant les charges électriques :

Neutron⁰ \rightarrow proton⁺¹ + électron⁻¹ + antineutrino , ce qui s'écrit au niveau des quarks :

$udd \rightarrow uud + \text{électron}^{-1} + \text{antineutrino}$, ou encore :

$d^{-1/3} \rightarrow u^{+2/3} + \text{électron}^{-1} + \text{antineutrino}$, qui s'opère par l'action d'un boson W⁻ :

$d^{-1/3} \rightarrow W^{-1} + u^{+2/3}$, suivi de $W^{-1} \rightarrow \text{électron}^{-1} + \text{antineutrino}$

Notez bien que ni l'électron ni l'antineutrino ne préexistaient à l'intérieur du neutron, cachés sous quelque coquille, ils sont créés par de l'énergie libérée. En se désintégrant, le neutron obéit à une loi constante de la nature qui est de tendre vers les états de plus faible énergie, ce qu'il fait en devenant proton dont la masse, donc l'énergie, est plus faible.

Au contraire du neutron , le proton isolé est stable ; il est même éternel, pour autant que nous sachions, sa durée de vie étant en tous cas supérieure à 10^{32} ans, donc notre soleil aura disparu bien avant une éventuelle désintégration de toute la matière de l'univers. La raison pour laquelle le proton est stable est que sa masse est la plus faible parmi tous les nucléons. Il ne peut pas, contrairement au neutron, perdre de la masse en émettant d'autres particules en vue d'une meilleure stabilité puisqu'il n'existe aucune particule plus légère dans cette famille.

- Tous les hadrons libres sont donc destinés à se désintégrer, sauf le proton libre qui seul peut subsister, réagit Robin.

- Exact, et cette force faible est la plus étrange, non seulement parce que c'est la seule qui relie entre elles des particules de masse et charge électrique différentes, et se sert à cet effet de bosons ayant une masse, bosons qui interagissent même entre eux, mais aussi parce que c'est une force indisciplinée qui ne respecte pas les symétries habituelles qui sont les bons usages des particules et des forces.

Tout le monde a remarqué que la nature aime les symétries, dont on trouve tous les styles : les enfants s'extasient sur la symétrie étoilée des flocons de neige, et que dire de celles des pétales de fleurs qui peuvent présenter des symétries radiales comme les marguerites ou des symétries planes comme les gueules de lion ou les iris ; nous-mêmes, à part quelques organes internes, sommes aussi à peu près symétriques par rapport à un plan vertical, ce qui nous permet de nous reconnaître dans un miroir.

En physique, la notion de symétrie est une généralisation des symétries géométriques habituelles, telles que l'image dans un miroir, qui conserve certaines propriétés de l'original comme les distances, mais pas toutes les propriétés, puisque la droite et la gauche sont inversées. Mais débarrassez-vous de ce point de vue géométrique limitatif de la symétrie pour adopter plutôt sa généralisation que voici : on dit qu'une interaction est symétrique par rapport à une grandeur physique si le résultat de cette interaction est inchangé lorsqu'on modifie cette grandeur physique ; par exemple toutes les interactions de particules donnent les mêmes résultats dans un laboratoire de Genève ou de Chicago, elles sont donc symétriques par rapport à l'espace. Elles sont aussi symétriques par rapport au temps car si on répète la même expérience à des dates différentes, on obtient les mêmes résultats.

Avec cette définition plus générale, on découvre que les symétries physiques sont liées à des lois de conservation : chaque fois qu'une interaction révèle une certaine symétrie, on peut être certain qu'il existe une quantité qui est conservée, c'est-à-dire qui reste la même avant et après l'interaction.

Ces lois de conservation démasquées par les symétries expriment en quelque sorte l'indifférence du monde aux choix faits par l'homme de référentiels arbitraires pour en analyser les phénomènes. Cela doit vous rappeler les idées d'Einstein qui sont à la base de la relativité, qui exprimaient que la mesure d'une grandeur physique doit être la même pour tous les observateurs, quels que soient leurs référentiels et leurs vitesses respectifs, souvenez vous des impressions symétriques des deux pilotes de fusées volant à $0,98 c$; eh bien c'est la même idée ! sans les mesures : Différents observateurs, dans différentes situations, doivent percevoir la même structure de la réalité. On pourrait dire que les symétries sont à la relativité ce que la topologie est à la géométrie.

On ne déterre les symétries qu'aux tréfonds de nos accoutumances, et lorsqu'on les a découvertes, elles nous révèlent les lois de conservation fondamentales qu'elles masquaient ; une opération apparemment insignifiante comme de laisser le temps passer sur nos observations nous éclaire sans que nous en prenions conscience sur quelques symétries de ce monde et les lois de conservation sous-jacentes qui facilitent son intelligibilité.

- On laisse effectivement le temps passer ! , interrompit Robin, et quelque chose me dit qu'il risque de se produire une dissymétrie entre le temps de ce matin et le temps de ce soir ; je crois que nous ferions bien de lever l'ancre et de remettre à plus tard la suite des symétries et la découverte de ces lois de conservation cachées.

- Tu as probablement raison, Robin , concéda le professeur, d'autant qu'il y a encore trop à dire sur ce sujet pour s'y attarder maintenant!

En route pour la fournaise de la vallée.

Seul un goulet étroit tranché dans le bord de la falaise permettait de quitter ce plateau par un chemin abrupt de pierres roulantes descendant en lacets serrés vers la vallée. Ils atteignirent très vite le niveau des forêts, heureux d'y trouver une ombre plus fraîche et un ruisseau qui longeait le chemin, où ils purent se rafraîchir la tête et les bras. Une petite heure de marche en sous bois les amena dans des prés qui les séparaient encore du village ; ils y retrouvèrent le soleil cuisant la peau entre deux passages de cumulus.

C'était jour de marché, le centre du village était interdit à la circulation, occupé par la foule des villageois et surtout des touristes qui erraient parmi les étalages bariolés ; Entre les grands éventaires classiques de vêtements, chaussures, fruits et légumes, poissonnerie et charcuterie, les producteurs locaux proposaient leurs fromages de chèvre, leur miel et quelques légumes biologiques, ou quelques produits de leur artisanat, des abat-jour, des bois sculptés, certains barbues et chevelus affublés de chapeaux de feutres indicibles étaient-ils d'authentiques éleveurs de chèvres, ou d'anciens drop out reconvertis dans cette région qui en avait accueilli beaucoup à la belle époque ?

Midi approchait ; dans l'épicerie du village où ils s'étonnèrent de trouver une telle diversité de produits pour un modeste bourg, ils remplirent leurs sacs à dos pour tenir jusqu'à la fin de leur expédition, complétèrent avec quelques achats de fruits sur la place du marché et s'installèrent à l'ombre de l'arbre de la liberté près de la fontaine municipale dont le bassin arrosé par les jets de quatre petits dragons rayonnait un peu de fraîcheur dans cette canicule rare à l'altitude du village, qui dépassait les mille mètres.

Grisella, qui avait fait un détour par la boulangerie les rejoignit avec une brassée de baguettes de pain croustillant qu'ils attaquèrent à belles dents. Les quatre petits dragons de

la fontaine déversaient leur jet d'eau fraîche dans un joyeux clapotis couvert par instants par les appels des vendeurs ou les piailllements d'enfants d'une colonie de vacance rentrant de promenade matinale. Ils burent directement au jet cette eau fraîche de la montagne en s'éclaboussant le visage.

- Aujourd'hui, pas de sieste, annonça Robin dès la fin du repas, on reprend la route tout de suite ; après cet arrêt ravitaillement, il nous faut regrimper de mille à deux mille cinq dans l'après-midi, avec en prime quelques longs parcours à plat.

- OK on y va, répondirent en cœur les trois autres en empoignant les bretelles de leurs sacs de montagne alourdis par leurs achats.

Ils traversèrent à nouveau le village qui s'assoupissait pour la sieste, seuls quelques commerçants finissaient de démonter leurs étals du matin sur la place du marché. La chaleur était accablante, et dans la marche à découvert jusqu'à la forêt, ils appréciaient le passage lent des gros cumulus qui les protégeaient quelques minutes de la fournaise. Ils avaient hâte de retrouver l'ombre des sous-bois et se promettaient de franchir ce niveau de la forêt le plus lentement possible pour profiter de sa fraîcheur.

Ils s'engagèrent avec un réel plaisir dans le sous-bois.

- Ne pourrait-on commencer par s'asseoir quelques minutes avant d'attaquer la pente? gémit le professeur Kirgard qui transpirait abondamment, j'ai déjà soif.

Ils quittèrent les sacs qui laissaient sur leurs dos de larges plaques de sueur et s'affalèrent sur le bord du chemin. Seul Kirgard sortit sa gourde et but à longues goulées.

- On peut peut-être terminer rapidement à l'ombre le chapitre des symétries qui cachent des lois de conservation, suggéra Grisella, quand le professeur se sera désaltéré.

- Sais-tu, Grisella, que ta proposition me donne une douleur à l'âme, car on ne peut pas parler des symétries sans évoquer Emmy Noether³⁴, qui était une mathématicienne comme toi, fille du mathématicien allemand Max Noether. L'époque et le pays où elle vécut de 1882 à 1932, n'a guère favorisé la culture scientifique des femmes : elle put suivre en cachette grâce à la protection de son père les cours de l'université d'Erlangen sans avoir le droit de s'y inscrire, car ce droit ne fut acquis aux femmes qu'en 1904 ; elle obtint alors tous ses diplômes, mais ne put rien en faire car tout poste d'enseignement lui fut refusé. Elle continua à étudier seule, puis rejoignit le groupe de mathématiciens de Göttingen dirigé par Hilbert qui reconnut très vite sa valeur et mit tout son poids pour lui faire obtenir un poste d'enseignement, mais sans succès, son travail remarquable étant seulement toléré pourvu qu'il restât bénévole ; ce n'est qu'à 41 ans qu'elle recevra son premier salaire, mais bientôt elle devra fuir l'Allemagne nazie et se réfugier aux États-Unis où elle ne survivra que deux ans dans un modeste emploi d'enseignement. Quelle tristesse !

Elle est entrée dans l'histoire grâce à son théorème, que je vous ai cité avant notre descente du plateau sans le nommer théorème de Noether, et que je répète : il dit que si une symétrie, ou une invariance si vous préférez, est respectée par un phénomène physique quelconque vis à vis d'une certaine grandeur, cette invariance implique l'existence d'une règle de conservation d'une autre grandeur physique.

Reprenons par exemple ce que je disais avant que Robin nous invite sagement à nous remettre en marche : «laisser le temps passer nous apprend des choses sur les règles qui régissent le monde» ; en effet, si en laissant écouler du temps, on observe que les lois physiques ne se modifient pas, et sont donc invariantes (ou symétriques) vis à vis de la grandeur *temps*, on peut en déduire le principe de la *conservation de l'énergie*.

³⁴ Jean-Pierre Pharabod et Bernard Pire, *Le rêve des physiciens*, p.125 Odile Jacob 1993

Un exemple: imaginez un monde où la gravitation varierait périodiquement dans le temps au lieu d'être invariante, il serait alors facile de créer de l'énergie électrique gratuite avec des centrales hydrauliques de pompage/turbinage pompant l'eau dans les moments de faible gravité et la turbinant quand la gravité est plus élevée. Il n'y aurait plus conservation de l'énergie et on trouverait enfin le mouvement perpétuel !

Bien d'autres lois de symétrie/conservation se vérifient dans tous les processus : la *charge électrique* totale portée par des particules entrant en réaction est conservée, de même que le *spin* total des particules engagées. Beaucoup d'autres grandeurs quantiques font l'objet de lois de conservation, les nombres quantiques ayant justement été définis afin de classer les particules en familles présentant des structures symétriques, et les interactions selon les lois de conservation qu'elles respectent.

On a observé que toutes les interactions conduisaient au même résultat par *réflexion* des composants dans un miroir, c'est à dire en inversant le sens d'une direction de l'espace (le miroir inverse la droite et la gauche) ; cela a conduit à attribuer aux particules un nombre quantique : la *parité P*, égal à +1 ou -1, comme si elles étaient des hélices ayant soit un pas à gauche, soit un pas à droite, car vous avez sans doute remarqué que l'image d'un tire-bouchon dans un miroir doit tourner dans l'autre sens pour pouvoir pénétrer dans l'image du bouchon, et on ne peut conserver le sens qu'en inversant le pas. Ces interactions qui étaient insensibles au miroir étaient dites invariantes par parité.

- Excusez-moi professeur, interrompt Robin, mais nous étions convenus de ne pas faire de sieste ; je ne vois pas clairement où nous mène cette contemplation des symétries et des lois de conservation de la nature, qui me paraît une digression un peu académique certes intéressante, mais plutôt risquée actuellement, car les nuages s'accumulent et il nous reste pas mal de chemin avant d'atteindre le refuge.

- Si je vous ai fait faire ce détour par les symétries, c'est pour finir d'éclairer le comportement fantaisiste du neutrino et de la force faible, avec lesquels nous n'en avons pas terminé. Alors que les autres interactions, forte, électromagnétique et gravitationnelle jouent chacune un rôle positif en participant aux actions d'organisation de la matière en noyaux atomiques, molécules et galaxies, la force faible et son complice le neutrino sont les assassins de cette matière, la désintégrant en se mettant hors-la-loi des symétries respectées par toutes les autres interactions, c'est pourquoi je viens d'employer l'imparfait en vous disant que toutes les réactions **étaient** invariantes par parité, car jusqu'en 1957, aucune violation de symétrie n'avait été observée dans les interactions entre particules, mais cette année là, la chute de la parité dans l'interaction faible fut découverte au Fermilab de Chicago³⁵ : la force faible ne respecte pas l'invariance dans le miroir, la *parité P* que je viens de vous citer.

Elle fait une différence entre la droite et la gauche alors que les autres interactions leur sont indifférentes : le spin du neutrino tourne toujours à gauche dans le sens de l'avancement de la particule, comme le symétrique miroir d'un tire-bouchon normal pour droitier, alors que toutes les autres particules comme les électrons, les protons et les neutrons existent en deux versions de spin +1/2 et -1/2 tournant à droite et à gauche. Y aurait-il dans la nature une gauche absolue comme il y a une flèche du temps ? Ce qui fit dire à Pauli : «Si Dieu est gaucher, pourquoi semble-t-il ambidextre lorsqu'il s'exprime par l'interaction forte».

Mais ce diable de neutrino commet un autre viol : son antiparticule, l'antineutrino lui correspondant par conjugaison de *charge C*, devrait lui ressembler sous tous les autres points et être aussi gaucher, mais voilà qu'il est droitier, ce qui veut dire que le neutrino n'a pas d'antiparticule et que l'antineutrino n'est l'antiparticule de personne.

On s'est un peu consolé de ces deux viols en croyant pendant huit ans que l'interaction faible respectait la symétrie *PC*, cumul des deux précédentes, mais en 1964, on a du se rendre à l'évidence que même cette symétrie composite n'était pas respectée de temps en temps, dans un peu moins de un pour cent des cas. C'est ce qu'on a appelé une violation faible, mais certaine, de la symétrie *PC*.

Alors les physiciens ont joué le grand jeu en ajoutant une inversion du temps *T*, et constaté avec satisfaction que cette fois la fantaisiste force faible respectait la symétrie globale *PCT*, comme toutes les autres interactions, bien que ne respectant pas chacune d'elles séparément.

Ces découvertes sur le comportement bizarre de la force faible ont donné des idées aux cosmologues quant à l'évolution du monde depuis sa création.

Ils pensent que dans la soupe primitive, lorsque la température était inimaginablement élevée, une symétrie parfaite régnait ; l'énergie injectée dans la création avait créé autant de matière que d'antimatière, toutes les particules actuelles et fossiles étaient en nombre égal, bosons aussi bien que fermions, les bosons étant probablement initialement indissociés sous la forme d'une "superforce", et on imagine que d'autres particules extrêmement lourdes ont pu très tôt exister, des bosons leptosquarks X et Y qui ont pu avoir un comportement légèrement dissymétrique analogue à celui de notre force faible actuelle.

Les recherches faites avec les grands accélérateurs en remontant le temps au moyen d'énergies de plus en plus fortes ont permis de conclure que des brisures de symétries sont apparues spontanément lors du refroidissement de l'univers, de manière analogue à l'apparition du magnétisme, qui est un cas manifeste d'asymétrie avec les inséparables pôles opposés nord et sud, qui n'apparaissent qu'en dessous de la température dite de Curie et n'existent pas au-dessus : l'apparition du magnétisme en-dessous de la température de Curie est une brisure de symétrie. Ainsi se seraient rompues les symétries des bosons et seraient apparues successivement les forces de gravitation, puis forte, puis électrofaible, puis électrique et faible entre 10^{-33} et 10^{-12} secondes.

³⁵ Léon Lederman, *Une sacrée particule*(p.275 et suite) Odile Jacob 1996

Ces acquis ont excité l'imagination des cosmologues qui se demandaient pourquoi la matière existe, et nous avec, puisque la création de matière et d'antimatière à partir de la fantastique énergie initiale du Big-Bang en a forcément produit des quantités rigoureusement égales qui auraient dû s'annihiler totalement ensuite et ne laisser que du rayonnement ? Ils ont alors imaginé qu'avant 10^{-33} seconde, ces leptosquarks X et Y se seraient désintégrés en quarks et leptons, mais un léger viol de symétrie, analogue à celui de la symétrie **PC** par la force faible, aurait pu faire qu'une population de un milliard + trois bosons X donne naissance au même nombre de quarks, alors que un milliard + trois antiX ne donne naissance qu'à un milliard d'antiquarks, qui se seraient immédiatement annihilés avec le milliard de quarks. Les trois quarks survivants auraient formé le premier proton au milieu de ce gigantesque gâchis, et notre univers serait né de ce très faible viol d'une symétrie.

C'est une tentative de réponse à l'incompréhension qu'exprimait Noël avant-hier soir face à cette stupéfiante guerre des particules et antiparticules qui a accompagné les tout premiers instants de notre univers.

Ces idées sont bien entendu encore hautement spéculatives, et aucune vérification expérimentale ne peut être faite de la validité de l'hypothèse de ces chimères que sont les leptosquarks X et Y car leur température d'existence dépasse de très loin les capacités de tous les accélérateurs envisageables, mais ce n'était pas inutile d'en parler pour conclure sur les forces, et j'espère que Robin me pardonnera d'avoir encore retardé notre départ de quelques minutes.



orageuse

Le cheminement dans le sous-bois fut reposant ; dans l'ombre tiède zébrée de rais de lumière vive, la montée lente et somnolente était presque une sieste. Lorsqu'une heure plus tard ils débouchèrent au niveau de prairies, ils retrouvèrent une chaleur plus intense, mais le soleil avait presque disparu, d'énormes cumulus qui viraient au gris sombre occupaient déjà les trois quarts du ciel.

- Le pronostic du brouillard de ce matin risque de se révéler exact, annonça Robin, je commence à douter que nous puissions atteindre le refuge sans orage.

Les hautes herbes qu'ils traversaient, d'habitude crissantes d'insectes, étaient étrangement silencieuses, la vie semblait engourdie par la chaleur extrême de l'après-midi. Une longue montée monotone leur fit rejoindre le pied des grands pierriers qui dévalaient des sommets ; seule une marmotte qui annonça leur visite en sifflant et quelques choucas qui tournoyaient au-dessus d'eux leur rappelèrent que la montagne était encore en vie.

Il restait environ une heure de marche lorsque le tonnerre rompit brutalement le silence, répercuté par les échos multiples des falaises avoisinantes. L'orage arrivait par le sud et le vent qui se levait l'amenait droit sur eux. Les éclairs se multipliaient dans le ciel assombri et le tonnerre ne fut bientôt plus qu'un roulement presque continu.

Ils purent encore parcourir cinq cent mètres avant que l'averse ne se déclenchât ; les K.Ways sortirent rapidement des poches des sacs.

- On va transpirer dans nos K.Ways, dit Noël en enfilant le sien.

- Ça ne va pas durer longtemps, opina Robin, la température va vite chuter avec l'averse.

Ils décidèrent de redescendre un peu vers un pli de terrain où ils pensaient être moins exposés à la foudre et s'accroupirent en un cercle assez large, s'enveloppant le plus possible dans leurs K.Ways pour laisser passer l'orage ; un vent violent tourbillonnait autour d'eux et la pluie leur fouettait le visage. Un assourdissant claquement de foudre frappa la falaise qui les dominait en même temps que l'aveuglante lumière de l'éclair illumina les gouttes de l'averse qui les cinglait sur fond de ciel noir ; des rochers se détachaient de la falaise et roulèrent dans le pierrier avec fracas.

- On a bien fait de redescendre ici, dit Robin, ça se gâte là haut.

Une dizaine de coups de foudre se succédèrent sur les cimes environnantes, le roulement des échos renvoyés par le relief était assourdissant, puis le bruit évolua peu à peu, semblant indiquer que l'orage s'éloignait vers le nord. Par contre l'intensité de l'averse n'avait pas faibli ; l'eau commençait à ruisseler dans le cou malgré les K.Ways serrés tant la

pluie était oblique, les chaussettes étaient trempées et imbibaient lentement l'intérieur des chaussures. La chaleur dont ils avaient souffert en début d'après-midi avait brusquement fait place au froid.

- L'orage est passé, dit le professeur, maintenant il faut qu'on marche, on ne sera pas beaucoup plus trempés.

Ils se remirent en route en s'ébrouant comme des chiens mouillés, et accélèrent inconsciemment le pas sous cette pluie diluvienne ; le tonnerre grondait maintenant loin vers le nord, mais le ciel uniformément noir n'augurait pas d'une fin proche de ce déluge.

Il leur restait moins d'une heure de marche pour atteindre le refuge, mais le parcours était un peu chaotique ; des ruissellements de plus en plus importants se formaient dans les plis du terrain, qu'il leur fallait franchir dans l'eau boueuse qui couvrait déjà les chaussures.

- Je crois me souvenir qu'il y a un torrent à traverser avant de remonter vers le refuge, dit Robin, j'y suis passé une fois où il était presque à sec, mais avec cet orage, il aura peut-être déjà gonflé.

- De toute manière, on a déjà tous les pieds mouillés, alors ça de plus ou de moins n'est pas bien grave, répondit Grisella qui manifestait un optimisme à toute épreuve.

- Le bon côté de la chose, ajouta Kirgard, c'est qu'on n'a plus besoin de sortir la gourde pour boire, il suffit d'ouvrir la bouche et le ciel en prend soin.

Lorsqu'ils commencèrent à descendre dans la combe qu'ils devaient franchir avant de remonter au refuge, ils s'arrêtèrent en tendant l'oreille : un grondement d'eau venait du fond où le torrent avait déjà reçu l'apport des ruissellements de toutes les ravines qu'ils venaient de croiser et de bien d'autres encore. Ils découvrirent en approchant que le torrent était beaucoup plus important qu'ils ne l'imaginaient : trois à quatre mètres d'eau grise et bouillonnante les séparaient de la rive opposée, et ils ne savaient pas trop quelle en était la profondeur, mais les rives assez abruptes leur donnait à penser qu'au centre, cela devait plutôt être de la hauteur d'un homme que de celle d'un genou.

Ils se trouvaient à la partie supérieure de la zone des forêts et pouvaient espérer trouver quelque tronc abattu à jeter en travers. La recherche ne fut en effet pas très longue et ils conjuguèrent leurs efforts pour traîner un hêtre déraciné qu'ils trouvèrent abattu sur la rive du torrent, à moitié immergé, dont ils purent tant bien que mal faire un pont flexible et incertain.

Robin l'essaya le premier avec précaution, élagua quelques branches gênantes et le stabilisa en sautant avec habileté sur le tronc souple ; il rejoignit l'autre rive sans difficulté.

Bravo ! nous voilà tirés d'affaire, exulta Grisella en s'engageant à son tour rapidement sur la poutre improvisée ; sous la pluie battante, elle atteignit le milieu, mais dans sa hâte glissa sur l'écorce détremée et dans un cri se retrouva dans l'eau jusqu'aux épaules, heureusement accrochée aux branches qui subsistaient sur le tronc. S'agrippant de branche en branche, elle put lutter contre le fort courant et se rapprocher de la rive opposée jusqu'à attraper la main que Robin lui tendait.

- On m'avait dit que les filles préfèrent en général le bain à la douche, mais toi tu auras eu droit aux deux aujourd'hui, lui dit-il en la tirant sur la berge.

- Elle n'est pas si froide que je pensais, répondit-elle avec son éternel optimisme, et après la canicule d'aujourd'hui, on peut supporter, mais j'ai hâte d'arriver au refuge.

Noël aida le professeur Kirgard à se mettre en place sur le tronc ; instruit par l'expérience malheureuse de Grisella, il avança avec une sage prudence en soignant son équilibre et atteignit l'autre rive sans encombre. Noël le suivit en prenant les mêmes précautions et le

groupe reprit sa progression vers ce refuge devenu mythique qu'ils espéraient apercevoir à travers la pluie qui continuait à leur battre le visage.

- Tu n'as pas froid, Grisella ? demanda charitablement le professeur.
- Pas en marchant, mais je regrette de ne pas avoir acheté une topette de rhum à l'épicerie pour nous faire un bon grog à l'arrivée, répondit-elle avec gaieté.
- Il doit rester environ cinq cent mètres, dit Noël, vous n'avez qu'à suivre le chemin, Robin veillera à ce que vous ne preniez pas de fausse piste, moi je cours devant pour ouvrir la porte, vérifier s'il n'y a pas d'autre surprise désagréable et préparer un peu votre arrivée.

Ils le virent disparaître à grandes enjambées dans le rideau de pluie et continuèrent leur marche en silence dans le vent qui tordait les arbres à la lisière de la forêt ; le déluge semblait ne jamais vouloir cesser.

La silhouette du refuge se dessina enfin dans ce décor wagnérien qui les entourait depuis une bonne heure. Encore vingt mètres et ils atteindraient l'entrée un peu abritée de la pluie où ils apercevaient entre les gouttes la silhouette de Noël qui les accueillait en riant et en criant dans le vent :

- Bienvenue, les amis ! cet orage a mis brutalement fin à nos vaticinations intellectuelles sur les forces de la microphysique en nous replongeant dans les forces brutes de la macronature ; j'ai eu pendant quelques instants l'impression d'être un homme des cavernes défendant sa peau face à la brutalité des éléments, il n'y manquait que quelques mammoths.

- Il est vrai que ce parcours sportif nous a reposé la tête de toutes nos divagations scientifiques précédentes, renchérit Robin tout ragaillard en s'ébrouant sur le seuil ; mais je dois être un peu homme des cavernes, ou husserlien puisque vous m'avez affublé de ce titre, car finalement j'ai plutôt apprécié la saveur inimitable du vécu de ces perceptions directes et brutales de la nature quand elle se fâche, ce qui n'est sans doute pas le cas de Grisella.

- Oh, moi ! dans dix minutes, ça ira mieux, mais je vous trouve injustes de vous plaindre d'avoir bénéficié d'une révision de physique occasionnelle pendant cette fin de vacances, et vous n'avez pas de pitié pour le professeur qui semble assez éprouvé par ce qu'on vient de subir. Allez, passez, professeur, on va vite allumer un bon feu dans la cheminée.

- Toi d'abord ! ma pauvre Grisella, tu es plus trempée que nous trois réunis.

- Ce n'est rien, les garçons vont vite nous allumer un bon feu.

Le refuge était un havre ; la porte refermée, on n'entendait plus que faiblement le hurlement du vent, et le battement de la pluie sur les vitres devenait un bruit de confort. En les attendant, Noël avait tiré du bois de la réserve et les flammes crépitaient déjà dans l'âtre. Ils quittèrent chaussures et chaussettes et les vêtements mouillés s'étalèrent sur les dossiers des chaises.

- Noël, tu es un ange d'avoir déjà allumé ce feu, dit Grisella, et se tournant vers Kirgard : ça va, professeur ? vous semblez un peu abattu, j'espère que ce ne sont pas les commentaires de mauvais goût de Robin et de Noël qui vous dépriment ?

- Non, c'est plutôt de me sentir un peu responsable de notre mésaventure sous l'orage car je vous ai retardés avec mes discours ; après tout je comprends fort bien qu'on puisse parler de divagations à propos des derniers sujets que nous avons abordé.

- Je crois que tu l'as vexé, chuchota Noël à Robin.

- Moi je ne trouve pas, professeur, réagit vivement Grisella en sortant de son sac un short et un tee-shirt de rechange qu'elle avait prévus avec une prudence toute féminine, cela nous a ouvert les yeux sur l'indéterminisme du monde subatomique, mais grâce au comportement statistique du macromonde, on y retrouve notre cher déterminisme et ses règles de causalité qui nous rassurent.

- Certes ! grogna le professeur d'un air morne, on serait encore plus dérouté si les phénomènes physiques se déroulaient de façon erratique sans possibilité de prévision ; la nature ne fait quand même pas n'importe quoi, et même si certains concepts restent parfois suspects, la reproductibilité des expériences ne ment pas, ou si elle ment, c'est toujours de la même manière, et même si la science n'est que l'étude de la régularité de ces mensonges, elle reste efficace ; d'ailleurs, dirait un physicien quantique de l'école de Copenhague dont je ne suis pas, "par rapport à quoi qualifier de mensonge un système d'apparences dont les régularités se reproduisent sans défaut n'importe où et pour n'importe qui?"³⁶

Mais un déterminisme statistique constitue tout de même une forme affaiblie du déterminisme pur. Cette causalité à laquelle nous tenons tant est-elle vraiment attribuable à la Réalité intrinsèque ? ou bien n'est-elle, comme le pensait Kant, qu'une forme obligée de l'entendement humain ?

- Vous semblez être comme un professeur Pangloss un peu fatigué qui douterait de lui-même, ricana Robin ; Pangloss, lui qui enseignait la métaphisico-théologo-cosmolonigologie ne doutait jamais et prouvait admirablement qu'il n'y a point d'effet sans cause³⁷, mais comme disait Hamlet³⁸ «il y a plus de choses entre ciel et terre que de paroles dans toute votre philosophie ! ».

- N'en rajoute pas ! Robin, l'arrêta Grisella, tu vois bien que le professeur est fatigué.

- Je peux certes passer pour presque aussi naïf que les vieux philosophes qui cherchaient la Réalité en soi sous les apparences, alors que je suis persuadé que c'est une chimère que de croire qu'on peut l'atteindre, si même elle existe, mais ni la philosophie de la Réalité d'Einstein à laquelle je me raccroche instinctivement, ni la philosophie de l'expérience de l'école de Copenhague, qui estime ne pas avoir besoin d'invoquer une Réalité quelconque, mais seulement de parler de résultats de mesures, ne me satisfont, et un orage comme celui qui nous a lavé la tête a réveillé en moi un vieux sentiment de vanité des spéculations, sentiment un peu trouble de devoir admettre que la stricte rigueur intellectuelle m'obligerait plutôt à parler comme les gens de Copenhague, qui sont en plein accord avec la philosophie positiviste intégrale de Wittgenstein, pour qui le seul langage pourvu de sens doit se limiter à décrire les faits d'observation de la nature, sans chercher à parler de concepts que l'homme peut pourtant juger essentiels, comme l'éthique, l'esthétique, ou cette Réalité en soi, ou Dieu, qui sont à écarter comme sans objet, car hors de la portée d'un langage chargé de sens : « sur ce dont je ne peux pas parler, je dois me taire », dit Wittgenstein, mais c'est tout de même un peu stérilisant de considérer que philosopher, c'est parvenir à reconnaître l'obligation de se taire³⁹, et cela ne veut pas dire que ce dont je ne peux pas parler n'existe pas.

³⁶ Bernard d'Espagnat *A la recherche du réel* p40 Gauthier-Villars 1991.

³⁷ Voltaire *Candide*

³⁸ Shakespeare *Hamlet*

³⁹ Ludwig Wittgenstein *Tractatus logico-philosophicus* CD-ROM Universalis® 1998.

J'ai trop souvent l'impression de regarder un spectacle sans vraiment le comprendre. Cette Réalité en soi, s'il en existe une comme j'en suis convaincu, reste toujours voilée, chaque mot, chaque concept, aussi clair qu'il puisse paraître, a seulement un champ d'application limité, les modèles mathématiques des phénomènes physiques ne sont que des projections incomplètes de cette Réalité dans le plan de l'entendement humain, ce n'est qu'une sorte de plan cadastral à la place du vrai paysage, des espèces de jumelles de théâtre permettant d'observer le spectacle de plus près, avec des verres interchangeable : Newton avait inventé les verres de la mécanique classique, Einstein y a ajouté le grand angle de la relativité qui donne une meilleure vue d'ensemble, les astrophysiciens y ont fixé un téléobjectif, Planck, De Broglie, Heisenberg, Born, Schrödinger, Pauli, Dirac et les autres y ont adapté les lunettes un peu floues de la mécanique quantique pour y voir de plus près, mais ces diverses approches du spectacle du monde n'apportent pas la compréhension profonde du jeu des acteurs et encore moins du texte, on ne fait toujours que regarder et commenter.

Tant que le couteau de Démocrite pouvait encore découper la matière, on avait quelque satisfaction à explorer les niveaux inférieurs car on y trouvait des particules directement observables qui semblaient constituer une réalité objective, mais on est arrivé au point où il n'y a plus de niveau de réalité objective, seulement des abstractions de nature mathématique fondées sur des groupes de symétries. Finalement, "comprendre" se limite à donner une description quantitative et prédictive des événements, peut-on s'en satisfaire?

En dehors de mon activité directe d'enseignement où je me sens quand même utile en emplissant la tête des étudiants de connaissances nouvelles pour eux, lorsque je médite sur mes propres connaissances, je me sens un peu triste de n'être qu'un professeur *qui regarde*, sans les satisfactions d'être acteur comme l'est un ingénieur ou un médecin. Bien que je sache qu'elle est inaccessible, je suis frustré de ne rien piger à la réelle intimité des choses. Je me dis que j'aurais sans doute mieux fait d'être un peu plus *homo faber* et un peu moins *homo sapiens*. J'ai le sentiment pénible que je mourrai idiot, et c'est une maigre consolation que de savoir que tous les scientifiques qui nous ont précédé sont également morts idiots ; quand je pense à ce pauvre Newton qui ne connaissait que la seule force de gravité parce que c'était l'action à longue portée la plus évidente, alors qu'aujourd'hui la force électromagnétique a livré presque tous ses secrets et qu'on en a ajouté encore deux autres qui étaient masquées par leurs très courtes portées, je le plains d'être venu trop tôt, mais quand je me dis que je ne vois toujours pas moi-même clairement ce qu'est vraiment une force, je me plains moi aussi. Malgré les progrès explosifs de la science au cours du dernier siècle, on n'est pas fichu d'expliquer ce qu'est vraiment la matière, si tout ce bazar a commencé ou recommencé, s'il y a eu un vrai premier commencement, on n'a que des vues parcellaires, des modèles qui changent tous les vingt ans et dont le dernier état reste insatisfaisant. On en est au même point que les philosophes dans cette enquête. Je ferais mieux de prendre ma retraite et de faire de la peinture. Il faudra bientôt que je songe à mon épitaphe, j'y verrais : « ci-gît Kirgard, qui a vécu avec intérêt, souvent avec plaisir, quelquefois avec bonheur et quelquefois dans la peine. Comme beaucoup d'autres, il a essayé d'y comprendre quelque chose, mais n'en a pas beaucoup plus compris que ceux qui n'ont jamais essayé ». Heureux les bergers de la montagne.

- Quelle tirade ! vous déprimez vraiment, professeur *qui regarde*, pourquoi se laisser abattre par nos insuffisances à pénétrer les secrets de l'univers et de sa création, avança gentiment Noël. Sauf votre respect, ce que vous nous dites là n'est pas vraiment nouveau, il suffit de relire les premières lignes du Tao Te King⁴⁰ : «Le nom que l'on peut exprimer n'est pas le nom éternel», ce qui, traduit dans votre langue de ce soir, veut dire que la réalité que l'on peut décrire n'est pas la "Réalité" avec un grand R, et une sentence Zen dit aussi : «à l'instant où vous parlez d'une chose, vous la manquez».

⁴⁰ Lao Tseu *Tao Te King*, Librairie d'Amérique et d'Orient 1981.

- Et sans aller puiser dans les philosophies orientales, ajouta Grisella, relisez Platon, qui dans le *Théétète*⁴¹ fait dire à Socrate: « ...les éléments premiers dont nous sommes composés sont inconnaissables et ne peuvent être que nommés ; au contraire les objets qui en sont composés sont connaissables, car la combinaison dont ils sont formés est l'essence de leur définition » , c'est aussi Platon qui pensait que nous vivons dans une caverne, et que tout ce nous croyons être le monde du réel n'est que l'ombre de ce monde sur la paroi de notre caverne.

- Et plus près de nous, compléta Robin, c'est le physicien Richard Feynman qui conclut philosophiquement: " je peux vivre avec des doutes et des incertitudes. Je pense qu'il est plus intéressant de vivre sans comprendre que d'avoir des réponses fausses".

- Sans doute, sans doute, mais cela ne m'empêche pas d'être de temps en temps repris par cette déprime pascalienne, car sur le fond des choses, on n'a pas vraiment progressé depuis qu'il a dit : «je suis dans une ignorance terrible de toutes choses ; je ne sais ce que c'est que mon corps, que mes sens, que mon âme, et cette partie de moi qui pense ce que je dis, qui fait réflexion sur tout et sur elle-même, et ne se connaît non plus que tout le reste. Tout ce que je connais est que je dois bientôt mourir, mais ce que j'ignore le plus est cette mort même que je ne saurais éviter».

- C'est vraiment la grande déprime, professeur, reprit Robin, il faut réagir, après tout on s'en fout de savoir avec quoi on pense, on arrive tout de même à des résultats sans philosopher ; bien sûr que les modèles sont toujours incomplets et révisables, mais ils sont hautement opérationnels dans leurs domaines de validité. Oubliez donc de temps en temps les vertiges de la science pure et réjouissez-vous des délices des sciences appliquées, mon moteur de voiture est une petite merveille, mon ordinateur l'est encore davantage, vive le métier d'ingénieur. La vraie sagesse n'est elle pas d'arrêter de vouloir tout comprendre ? La vie est là pour la vivre, que diable, pas pour l'analyser sans cesse.

- Robin a raison, renchérit Grisella, et il y a tellement d'autres choses encore plus mystérieuses que la physique, et dont on peut pourtant jouir sans en comprendre la nature profonde. Si on demande à Noël ce qu'est la beauté qui l'attire tant, il sera aussi embarrassé pour l'expliquer que saint Augustin l'était au sujet du temps, et pourtant cela ne l'empêche pas de se réjouir de la beauté d'un lys martagon, ni moi de m'envoler sur une fugue de Bach au violoncelle.

Depuis longtemps vous savez très bien au fond de vous-même que l'intimité des choses et des phénomènes est inaccessible, et il n'y avait même pas besoin d'être un scientifique moderne pour découvrir cela, un philosophe suffisait, rappelez-vous Kant qui disait que l'on ne pouvait avoir aucune certitude sur la nature du monde "en soi" : "das Ding an sich" la chose en soi, que l'on ne pouvait approcher qu'à travers ce que vous appelez ses projections dans l'entendement humain et que lui appelait "das Ding für mich" la chose pour moi. Il n'y a tout de même pas de quoi désespérer pour cela. Je propose d'inverser les rôles pour ce soir, et que vous soyez un élève puni de cette déprime temporaire en copiant cent fois votre propre phrase : heureux les bergers, heureux les bergers de la montagne, heureux les bergers... et en essayant de la vivre. Rapprochez-vous d'abord du feu et finissez de vous sécher, c'est l'orage de cet après-midi qui vous a mis dans cet état ; heureusement le dîner sera bientôt prêt et la soupe chaude va nous remonter le moral à tous après ce déluge.

- Arrêtez de donner dans l'angélisme bucolique, ironisa Robin, vous croyez vraiment que les bergers sont plus heureux, ils râlent après les loups qui dévorent leurs brebis, après le cours de la viande de mouton ou du fromage, après leur isolement ; tu connais quelqu'un qui est heureux, toi? Moi je ne connais que des moments heureux.

⁴¹ Platon *Théétète* Garnier Flammarion 1967

Attention ce genre de déprime, professeur, insista Robin, c'est un point de basculement, avec l'insatisfaction des modélisations qu'offre la science jointe à la réflexion sur la mort, il y a là tous les ingrédients qui conduisent à la religion .

- Arrête un peu, Robin ! réagit vivement Grisella ? Tu n'as jamais essayé d'explorer toi-même une vision religieuse, une sorte de grille de lecture du monde offrant une modélisation élargie pour comprendre ce monde et mieux structurer ta vie en comblant un déficit de sens ?

- Je sais bien que l'homme ne peut renoncer à chercher un sens à tout, contrairement aux bienheureux animaux, s'entêta Robin. À moins d'être frappé par la foi comme par la foudre de cet après-midi, ce qui ne fut pas mon cas ni pour l'un ni pour l'autre, il faut pénétrer dans ce domaine avec la plus grande prudence ; les religions ont un côté attractif et rassurant parce qu'elles prétendent offrir des représentations plus globales du monde, incluant une finalité qui ne figure pas dans les objectifs de la science, mais qui ne présentent en aucun cas la solidité des représentations de la science qui, elles, sont toutes vérifiables.

Il y a toujours dans toute religion un dogme invérifiable introduit à un moment de l'histoire par un prophète, consolidé ensuite par une église au cours des siècles, et on doit accepter ce dogme invérifiable pour jouir d'une représentation holistique du monde et de l'homme.

Ces explications globales de l'univers et du rôle de l'homme ont satisfait les populations aux époques où les connaissances scientifiques étaient trop limitées pour porter la contradiction sur tel ou tel point du dogme, et les ont aussi conduit à s'entre-tuer au nom de ces dogmes . L'emprise des religions est heureusement un peu moins aisée maintenant que les connaissances scientifiques acquises depuis un siècle, qui dépassent de très loin toutes celles accumulées depuis des millénaires, ont imprégné le langage et la pensée modernes d'un besoin de clarté issu de cette culture scientifique ambiante, au moins dans les milieux intellectuellement développés.

On peut certes dire que la vie moderne est un attentat permanent contre le mysticisme, pourtant force est de constater que ce mysticisme reste un besoin pour beaucoup d'hommes et que les religions qui font le plus parler d'elles survivent encore depuis deux millénaires, à plus ou moins 600 ans près pour Bouddha et Mahomet, malgré toutes les erreurs et les horreurs qu'elles ont pu commettre. L'histoire nous a amplement démontré que l'on tue et qu'on se fait tuer davantage pour des croyances que pour des certitudes. On voit des fondamentalismes renaître et se développer ici et là, recherchant leur cohérence en rejetant toute acquisition de connaissances, toute science, niant l'école. Dieu nous préserve des religions !

- Ton approche de la religion est peut-être un peu sommaire et effectivement trop marquée par la culture scientifique ambiante, contesta Noël, pourquoi s'étonner de l'insuffisance de la science à pénétrer au cœur de la Réalité, Saint Augustin disait déjà: «La sagesse de Dieu échappe au calcul». je ne pense d'ailleurs pas que le besoin de religion ait été seulement alimenté par le désir d'une compréhension plus globale du monde à travers une grille de lecture, comme dit Grisella, personnellement j'y vois quelques autres sources :

. D'abord l'émerveillement face à la richesse et la beauté du monde qui nous est offert, dépassant de si loin toute possibilité de création humaine, émerveillement sans véritable recherche d'explication des mécanismes, plutôt stupéfaction, contemplation, que l'on retrouve d'ailleurs dans l'hindouisme ; tout cela semble trop bien organisé pour être fortuit, et cet émerveillement suscite spontanément l'idée d'un créateur, c'est le Dieu horloger de cette très complexe mécanique qu'est l'univers. Même Voltaire en était frappé lorsqu'il écrivait :

*L'univers m'embarrasse et je ne puis songer
Que cette horloge existe et n'ait pas d'horloger*

Cette idée paraît peut-être un peu démodée à certains, on peut pourtant encore oser l'émettre sans complexe.

. Ensuite, j'y vois bien sûr le rejet instinctif de la mort et la méconnaissance de ce qu'elle représente ; la nécessité de Dieu a toujours été liée à la mort. On trouve dans toutes les civilisations une quête d'immortalité : les élixirs de longue vie traînent aussi bien dans les textes grecs que dans le Tao Te King de Lao Tseu, le devenir des morts était une préoccupation essentielle des Egyptiens, les différentes formes de paradis ou d'enfer existent dans toutes les religions monothéistes.

. Mais j'y vois aussi une source tout à fait particulière aux religions chrétiennes, c'est l'amour, que le Christ a introduit comme une nouvelle facette de la religion, l'amour de Dieu par l'homme, de l'homme par Dieu et de l'homme par l'homme, et aussi le pardon des fautes, qui fait partie de l'amour. Je ne sais plus qui a dit de Dieu : «Par l'amour on peut le saisir, par la pensée jamais», et le Bouddhisme a introduit aussi quelque chose de voisin à des nuances près : la compassion. Et ça, la science n'y a rien à voir.

Robin joua les cyniques :

- Croire que le christianisme a le monopole de l'amour, cela ressemble un peu trop à certains socialistes qui croient avoir le monopole du cœur.

Et la mort ! Si on n'attachait pas une telle importance à la mort, on ne se poserait pas tant de questions sans réponse ; après tout, on peut considérer que c'est Épicure qui avait raison : «la mort ne nous concerne pas, tant que nous existons, elle n'est pas là, et quand vient la mort, nous n'existons plus. On n'a encore jamais entendu quelqu'un se plaindre d'être mort».

La mort est pleine de bienfaits, elle est d'abord nécessaire à la vie. Si la mort n'existait pas, comment la planète pourrait-elle supporter l'accumulation de vivants qui commencent déjà à y devenir trop nombreux, ses ressources n'y suffiraient pas, il faudrait interdire les nouvelles vies. Elle introduit aussi une justice égalitaire totale après les inégalités chromosomiques et autres dont les pauvres humains sont victimes ; C'est de Gaulle qui disait de sa fille handicapée après son décès : au moins, la voilà maintenant comme tout le monde.

Quant au Dieu horloger, cette hypothèse ne m'est pas indispensable, comme disait Laplace.

- Robin le cynique, n'as tu jamais entendu cette phrase dans ton sommeil : " tu ne me chercherais pas si tu ne m'avais déjà trouvé " ?.

- Aïe! C'est exactement le type de phrase racoleuse dont j'ai horreur, et qui déforme la situation ; je crois qu'il faudrait plutôt dire : tu ne me chercherais pas si tu n'avais pas une telle envie que j'existe pour calmer tes angoisses ; c'est peut-être vrai pour ceux qui nourrissent des angoisses métaphysiques.

Grisella, qui aidait le professeur Kirgard à sécher ses vêtements devant l'âtre, vint charitablement à son secours :

- Êtes-vous bien certain, professeur, d'avoir dit la vérité en déclarant que vous pensiez mourir idiot ? Je crois plutôt que vous pensiez : «je suis certain de mourir en cherchant encore à comprendre», vous connaissez l'histoire du scientifique qui meurt et rencontre Dieu qui lui dit : «Maintenant, je vais tout te dire, tout t'expliquer» Et le scientifique s'écrie : «surtout pas ! Laissez moi chercher encore !».

Mais le repas est prêt, nous pourrions toujours reprendre cette discussion philosophique imprévue le ventre plein.

Dans la douce chaleur dispensée par l'âtre de ce refuge bien protégé des intempéries, après les dîners plus spartiates des soirées précédentes en plein air dans le froid de la montagne, ce repas fut une bombance réconfortante. Le potage brûlant les réunit en cercle autour de l'âtre où ils purent ensuite faire griller à loisir des pommes de terre en robe des

champs et les saucisses achetées l'après-midi au village, tout engourdis par l'ardent rayonnement du foyer sur leur peau et leurs vêtements encore un peu humides ; les baguettes de pain frais, heureusement protégées de la pluie dans les sacs à dos étanches, avaient gardé le craquant qui réjouit les palais. La boisson aussi était renouvelée avec les nouvelles boîtes de l'inévitable Coca Cola pour les jeunes accros de cette drogue internationale et un peu de vin frais de Châtillon en Diois qui contribua à remonter le moral du professeur fatigué. Les abricots de Provence clôturèrent ce repas presque gastronomique, et c'est Kirgard qui réamorça le débat :

- Je vous dois des excuses pour nous avoir infligé l'orage en retardant notre marche par mes discours, et pour vous avoir un peu gâché notre arrivée au refuge avec ce coup de blues ; je donne acte à Grisella de la justesse de son interprétation de mon "mourir idiot", il y a tant de commissaires de police qui sont partis en retraite et sont morts sans avoir résolu toutes les énigmes policières auxquelles ils ont été confrontés que je ne serai pas le seul dans mon cas, mais il y a encore tellement de choses à mieux comprendre que parfois je m'énerve un peu en voyant fuir le temps entre mes doigts. Même sans aller fouiller au-delà de la physique fondamentale, ce "modèle standard", par exemple, ne peut satisfaire pleinement un physicien un peu esthète, avec ces encore trop nombreuses particules élémentaires et surtout ces distributions de masses qui paraissent arbitraires.

Il est probable que dans dix ou vingt ans, lorsque le LHC du CERN aura produit des résultats à des niveaux d'énergie plus élevés, un nouveau "modèle standard" verra le jour, avec peut-être une explication rationnelle du pourquoi des masses, par cette fameuse particule de Higgs qui se laisse entrevoir, peut-être la théorie des supercordes aura-t-elle pu être vérifiée, et peut-être aura-t-elle résolu le conflit majeur de l'incompatibilité entre la Relativité Générale et la théorie quantique, qui ne permettent pas de traiter avec les mêmes lois toute la nature, depuis ses composants les plus infimes jusqu'aux plus vastes et plus massifs de l'univers entier, et empêche donc la compréhension des tous premiers instants du monde lorsque celui-ci était à la fois d'une dimension subatomique correspondant à l'outil quantique, et déjà monstrueusement massif, requérant l'outil relativiste, mais je ne serai probablement plus là pour connaître ce nouveau pas. Je me console un peu lâchement en sachant que de toute façon, les énergies réalisables dans les futurs grands accélérateurs avec des financements internationaux acceptables n'iront sans doute pas très au-delà des quelques dizaines de TeV du LHC, énergies modestes face aux quelques bombes heureusement rares du milliard de TeV que nous lâchent les rayons cosmiques, et qui resteront elles-mêmes très en dessous du niveau qui permettrait de démêler ce qui pouvait se trouver dans la soupe primordiale au tout premier instant du Big-Bang et qui doit se situer du côté de 10^{16} TeV.

Et cette physique quantique que l'on pratique tous les jours en appliquant ses recettes de cuisine sans parvenir à en comprendre la signification profonde s'il y en a une, cela me donne de l'urticaire.

Vous voyez que mes pensées morbides étaient plutôt terre à terre et ne débordaient pas vraiment comme le craignait Robin sur le domaine religieux que je n'aime pas beaucoup aborder car je m'y sens mal à l'aise face à un vocabulaire qui m'apparaît comme une langue étrangère ; le scientifique use d'un vocabulaire prudent et soigneusement défini, avec pour règle de n'admettre comme véridique que ce qui n'a jamais pu être réfuté par personne, et tout particulièrement par ses pairs compétents, et peut être revérifié à tout moment, alors qu'en matière de religion on doit admettre un dogme sans possibilité de vérification de sa véracité ; par nature la science doute, alors que la religion affirme. On retombe alors sur le problème insoluble de la foi qui vous tombe dessus ou tombe à côté.

- Quand la grâce de la foi est tombée à côté de vous sans vous toucher, grogna Robin, on trouve que les soi-disant grilles de lecture proposées par les religions sont très habiles, soit on y trouve tout et son contraire comme dans le Coran où certains lisent la tolérance et d'autres le devoir d'égorger les infidèles - il est vrai que c'est une religion qui a six siècles de retard sur le christianisme qui, lui, s'est un peu calmé côté infidèles - soit la part

d'inconnaissable permet des échappatoires terribles à toutes les circonstances : si un gamin se tue en vélo ou si une mère de six enfants meurt en couches en mettant au monde le septième, le prêtre rappellera que les voies du seigneur sont impénétrables, gloire à lui, Dieu d'amour. Un musulman pourra toujours dire qu'Allah n'est pas obligé d'être juste dans toutes les choses qu'il a créées ici-bas⁴². Il faut admettre qu'un tel modèle est puissant puisqu'il est capable de tout justifier, mais il exige une soumission mentale dont je ne suis pas capable.

- Pourquoi reprends-tu ton rôle d'athée de service, Robin, c'est toi qui attaques à nouveau sur ce terrain que le professeur Kirgard semblait vouloir esquiver.

- C'est pour décharger un peu ma bile, il y a tellement de choses qui me dérangent, par exemple cet anthropombrilisme infantile, qui était peut-être cohérent avec la représentation du monde d'avant Galilée où la terre et l'homme étaient au centre d'un monde fixe, mais comment croire aujourd'hui que l'univers est fait pour l'homme quand on replace notre petite planète Terre errant dans un coin perdu de la voie lactée parmi des milliards d'étoiles semblables à notre soleil, la voie lactée elle-même perdue parmi quelques milliards d'autres galaxies plus ou moins semblables, tous les soleils de toutes ces galaxies ayant chacun une chance raisonnable de posséder des planètes. Pourquoi Dieu aurait-il gâché tant de matière et d'antimatière pour créer cet univers démesuré si l'objectif final était l'homme ? Pourquoi ce Dieu aurait-il commis ce gaspillage incroyable de matière et d'énergie pour un petit bonhomme apparu dans un infime recoin de cet univers et seulement dans le dernier pour cent du temps écoulé depuis qu'il a commencé son travail ? quel gâchis et quel manque d'optimisation ! Ce n'est pas du travail d'ingénieur.

Trop, c'est trop ! l'univers nous rend ridicules, l'homme est totalement marginalisé par la connaissance scientifique de l'univers. Cioran, qui était également passé à côté de la foi, le clamait : *«ce matin, après avoir entendu un astronome parler de milliards de soleils, j'ai renoncé à faire ma toilette : à quoi bon se laver encore ?⁴³»*

- Certes, ironisa Noël, cela peut paraître un grand mystère que la Terre soit si petite dans un monde aussi grand, et je comprends que cela intrigue ma petite sœur, mais cela ne m'a encore jamais empêché de me laver, et j'hésiterais à me référer à ce dandy de Cioran.

Même un homme de foi est certes frappé par l'apparente insignifiance de l'homme, et "le silence éternel des espaces infinis m'effraie" de Pascal en est le témoin, mais on peut voir les choses autrement sous l'angle de l'évolution vers la complexité en songeant que 98% de la matière de l'univers n'est que de la matière la plus simple qui soit, de l'hydrogène et un peu d'hélium, la matière plus élaborée qui remplit les cases du tableau de Mendéléiev n'en représente que 2% seulement. La matière vivante ne représente à son tour qu'un infime pourcentage de ces 2%, et l'homme n'est quantitativement qu'une poussière dans le règne du vivant, mais il fallait bien que tout ce cosmos existe et évolue depuis longtemps, que des étoiles explosent en fin de vie pour répandre des éléments lourds dans le vide interstellaire pour que des planètes se forment autour des soleils et que sur certaines d'entre elles des conditions propices permettent l'apparition de la vie et son évolution jusqu'à nous et des cousins probables en d'autres endroits de l'univers. Pour Trinh Xuan Thuan, "l'homme n'a pas émergé par hasard dans un univers indifférent. Au contraire, tous deux sont en étroite symbiose : si l'univers est si grand, c'est pour permettre notre présence"⁴⁴

Pourquoi s'étonner d'arriver si tardivement dans une création si ancienne et s'angoisser devant un univers si immense puisqu'il fallait ces milliards d'années pour que l'alchimie nucléaire des étoiles fabrique ces structures complexes qui nous ont mis sur cette Terre et que l'expansion qui a créé cette immensité est en relation nécessaire avec cette ancienneté ?

⁴² Ahmadou Kourouma *Allah n'est pas obligé* Seuil 2000

⁴³ Jean Audouze, Michel Cassé, Jean-Claude Carrière, *Conversations sur l'invisible*; p143 Plon 1996.

⁴⁴ Matthieu Ricard, Trinh Xuan Thuan *L'infini dans la paume de la main* p62 Fayard 2000

- Tiens, il me semble que tu viens de faire un peu avancer notre enquête, Noël, opina Grisella.

- Rassure toi, moi non plus je n'ai pas cessé de me laver à la pensée de notre infime présence dans l'univers, reprit Robin, mais ce que je trouve le plus débile, c'est cet anthropomorphisme qui atteint son comble dans la religion catholique qui nous invite à croire à un Dieu qui est né, qui a grandi, qui a souffert et qui est mort et ressuscité, un Dieu qui a une mère, Marie, et un père qui est Dieu le Père. C'est infranchissable pour la raison humaine.

- Mais c'est le noyau dur du christianisme, mon vieux, dit Noël, c'est le mystère de l'incarnation : Dieu a donné son fils pour la rédemption des hommes. C'est aussi le mystère de la sainte trinité, avec le père créateur du monde au-dessus de nous, le fils incarné à côté de nous, qui a apporté l'amour, et le saint esprit qui est l'artisan caché dans nos cœurs, aidant Dieu à parfaire son œuvre.

- Pour moi ce ne sont qu'allégories et pathos théologique. Grisella a qualifié tout à l'heure les religions de "modélisations élargies", c'est peut-être une façon de voir les choses ; en ce cas, je trouve que certaines de ces "modélisations" sont devenues bien trop complexes pour être crédibles, ce sont sans doute les conciles historiques de l'église qui ont voulu en faire trop et ont gâché le message initial en introduisant cette complexité. Personnellement, je trouve que sur un terrain aussi mouvant, la "modélisation" à minimum est la moins risquée : "Allah akbar" devrait suffire et offre moins le flanc à la critique que tout ton pathos.

- Il est clair, tempéra Kirgard, qu'il y a de grandes difficultés pour un scientifique à parler de religion, car il lui est difficile de se départir de son langage rationnel et d'utiliser un langage poétique. Les deux langages sont comme deux fluides non miscibles. J'ai remarqué que les scientifiques chrétiens qui consentent à décrire comment ils vivent la cohabitation de la science et de la foi⁴⁵ font en général deux exposés : un sur leur science et un sur leur foi, mais on a le sentiment que ces deux exposés sortent de deux cases de leur cerveau ne communiquant pas vraiment, car les deux langages sont forcément étrangers l'un à l'autre.

Il y a difficulté pour beaucoup d'hommes actuels plus ou moins pourvus de culture scientifique à s'intégrer totalement dans une église lorsqu'ils n'y ont pas été couvés. Les scientifiques munis d'une foi n'ont en général pas choisi rationnellement leur foi sur le marché des religions, mais ont été couvés dans l'une d'elles. Trop de réserves traînent dans l'esprit des autres pour leur permettre d'adhérer pleinement aux côtés de sectaires prompts aux erreurs judiciaires, ils craignent de cautionner par leur adhésion des erreurs passées ou même futures de leur église. J'ai personnellement été marqué dans mon enfance par le "Gott mit uns" que je voyais écrit sur la boucle du ceinturon des soldats Allemands occupant la France, je me demandais pourquoi Dieu était avec les allemands ; heureusement, il a changé de camp vers la fin de la guerre. Cela a été pour moi comme un vaccin de scepticisme me rendant méfiant vis à vis des religions.

La caution de Dieu est trop facile à revendiquer, elle a fait des millions de victimes depuis les guerres de religion, l'inquisition et jusqu'aux atroces tueries islamistes, les incroyables attentats suicides du World Trade Center et du Pentagone aux États-Unis et ceux qui ont suivi dans diverses capitales occidentales et dans les pays musulmans eux-mêmes; je préfère me tenir à distance de la religion ; là encore je suis un professeur *qui regarde*, en ayant conscience que ce n'est pas très glorieux, mais il ne s'agit pas là de chercher la gloire, mais d'être honnête avec soi-même.

Si demain un gouvernement autoritaire nous forçait à afficher une religion sur notre carte d'identité, je me demande si je ne serais pas tenté d'y indiquer bouddhiste : Cette religion, qui en est à peine une et que certains considèrent plutôt comme une philosophie pratique,

⁴⁵ *Le savant et la foi* ouvrage collectif présenté par Jean Delumeau. Flammarion 1991.

me semble être la moins incompatible avec l'esprit scientifique, la seule qui puisse côtoyer la science sans avoir recours à un autre langage ; elle ne dit pas que l'univers a été créé pour l'homme ni que l'homme est l'image de Dieu, elle ne propose qu'un assez faible contenu dogmatique ; bien sûr il y a la réincarnation, mais est-ce beaucoup plus difficile à accepter que la présence réelle du Christ dans l'eucharistie ou le paradis et l'enfer, et cela me paraît même moins difficile à concilier avec notre esprit d'analyse que la résurrection des corps qui laisse un flou artistique sur l'âge du corps qui réapparaîtra en résurrection, dans l'incomplétude du bébé? dans le bourgeonnement de l'adolescence? dans la plénitude de la jeune maturité? dans la sagesse supposée de l'âge mûr? dans la sénescence de la vieillesse?

C'est aussi une religion non invasive, dont la tolérance et la compassion sont sans ambiguïté les vertus fondamentales, qui ne prend pas le sabre pour convertir l'infidèle, qui n'a jamais considéré que celui qui refuse sa foi a l'esprit possédé du démon, une religion qui n'essaie pas de se propager.

Le bouddhisme a certes toutefois des positions un peu extrêmes sur la science que j'aurais des difficultés à adopter, il considère que la nature ultime du monde est la vacuité, pour lui les phénomènes du monde ne sont que des apparences dénuées de réalité, alors que la culture occidentale dont j'ai hérité croit en la réalité des phénomènes, du temps et de l'espace. C'est cette croyance en la réalité des choses de ce monde qui a conduit à leur chercher une origine, alors que le bouddhisme n'éprouve pas ce besoin et parle peu de la création du monde et d'un Dieu créateur qu'il nie plutôt, car pour lui le temps est cyclique et l'univers éternel sous des formes évolutives et cycliques, comme dans l'hindouisme.

Le bouddhisme indique aux hommes des façons de vivre au mieux ce passage imposé qu'est leur vie actuelle, et tente de limiter leurs souffrances en leur enseignant que cette souffrance vient essentiellement de leur attachement à des formes fixes, que ce soient des objets, des personnes ou des idées, au lieu d'accepter le mouvement perpétuel du monde ; à ce titre, il nous demande de renoncer à l'imposture de ce *moi* non durable et de pratiquer l'état de vacuité, porteur de compréhension et de compassion.

Le scientifique peut trouver quelques ressemblances entre les religions orientales et sa propre perception du monde :

- La reconnaissance que cet univers est mouvement continu, c'est la Samsara, qui évoque le mouvement incessant du monde subatomique,
- Ce rôle du vide ayant un potentiel créatif infini, implicite aussi dans la notion de Tao, qui est un vide sans forme qui porte potentiellement toutes les formes, comme l'est le vide quantique des physiciens contemporains:

*« Quand on sait que le Grand Vide est plein de Ch'i⁴⁶
On sait que le néant n'existe pas. »*

Le parallélisme prémonitoire du Taoïsme va même plus loin dans la description des transformations du vide :

«Le Grand Vide ne peut qu'être composé de Ch'i ; ce Ch'i ne peut que se condenser pour former toutes choses ; et ces choses ne peuvent qu'être dispersées pour former à nouveau le Grand Vide»⁴⁷

Cette notion de vide empli de "souffles vitaux" évoque la richesse créative du vide quantique de la physique, potentiel infini de manifestations de phénomènes, de même que la vacuité recherchée de l'esprit dans la méditation évoque l'esprit d'ouverture que doit montrer

⁴⁶ Ch'i = souffle en chinois

⁴⁷ Fritjof Capra *Le Tao de la physique* p218 Sand 1992.

tout scientifique en faisant le vide des idées préconçues afin de construire de nouvelles images du monde, ce qu'a si bien su faire Einstein.

Je sais bien que dans un livre par ailleurs plein d'obscurités, on peut lire ce qu'on veut y lire, mais on reste frappé par quelques unes de ces phrases vieilles de plus de 2500 ans :

« Le terme Non-Être indique le commencement du ciel et de la terre ; le terme Être indique la mère des dix mille choses.

Aussi est-ce par l'alternance constante entre le Non- Être et l'Être que, de l'un on verra le prodige et, de l'autre, on verra les bornes.

Ce qu'ils ont en commun, je l'appelle le mystère, le mystère suprême, la porte de tous les prodiges⁴⁸ »

- Ce genre de parallélisme entre quelques traits de religions orientales et quelques caractères de la science moderne me semble assez hasardeux, défendit Noël, cela fait très Zen de San Francisco ou New Age, c'est un peu de la conciliation ; moi je reste frappé par la violente originalité de la religion chrétienne, l'inversion fondamentale des valeurs⁴⁹ qu'elle introduisit : "Le monde attendait peut-être un messie royal, il eut Jésus qui n'est pas mort âgé et honoré comme Mahomet, mais exécuté à un peu plus de trente ans, abandonné de ceux qui l'avaient suivi, et on a dû méditer sur ce crucifié impuissant sur un gibet et comprendre que la valeur est donnée aux actes à proportion de l'amour qu'ils comportent.

Le peuple attendait peut-être de la majesté en harmonie avec celle de la création, il eut un homme qui lava les pieds de ses disciples en leur disant : vous m'appelez maître et vous faites bien car je le suis, et vous aussi vous devez vous laver les pieds les uns les autres. Il fut un condamné que le doute frôla dans son agonie : Père, si c'est possible, que ce calice s'éloigne de moi, mais que ce ne soit pas ma volonté qui se fasse, mais la tienne". C'est au plus faible de ses disciples, Pierre, dont il avait prédit qu'il le renierait trois fois avant le chant du coq, que Jésus a confié de bâtir son église.

- Mais comme disait saint Paul : «Si le Christ n'est pas ressuscité, alors mangeons et buvons, car notre foi est vaine», coupa Robin sarcastique.

- Si on retourne au nouvel éclairage que nous donne la physique quantique, tempéra Kirgard, on doit admettre que c'est un bouleversement qui éloigne du matérialisme mécaniste antireligieux de la fin du dix neuvième siècle, qui croyait expliquer le monde par des assemblages d'atomes de substances en nombre limité, interagissant entre eux selon des lois déterministes, ce qui permettait à Laplace de penser qu'à partir de la position et de la vitesse de tous les atomes du monde à un instant donné, un superordinateur permettrait de déterminer les comportements passés et à venir de tous ces atomes, donc du monde.

Cette vue totalement déterministe, d'un matérialisme horloger un peu simpliste, où d'ailleurs l'éventuel horloger n'avait eu qu'à fabriquer l'horloge et à la mettre en route, puisque ensuite elle marchait toute seule par le mécanisme de la cause et de l'effet, contribuait à considérer comme inutiles les religions et les philosophies. Nous n'étions que des marionnettes sans aucun libre-arbitre.

Maintenant que l'on a compris que ces morceaux de matière sont faits de particules dont la représentation fidèle n'est pas imaginable, et qui ne peuvent être approchées qu'au moyen d'abstractions mathématiques, particules ponctuelles ou supercordes dont l'existence n'est peut-être pas seulement locale, et qui n'obéissent plus vraiment au déterminisme, la vision assez triste selon laquelle nous ne serions que le résultat éphémère et sans signification de chocs et de combinaisons de petites "billes" errant dans l'espace ne peut plus avoir cours et ce matérialisme classique, qui imprègne pourtant encore notre société, devient ringard.

⁴⁸ Lao Tseu, *Tao Te King* Librairie d'Amérique et d'Orient traduction Duyvendak 1981.

⁴⁹ André Lichnérowicz *le savant et la foi* p202 Flammarion 1991.

- Je ne trouve pas beaucoup plus réjouissant d'être le résultat de tirages au sort aléatoires que de chocs de billes déterministes ! ricana Robin.

- Le paysage philosophique n'est tout de même plus aussi bouché que celui d'Auguste Comte, reprit Kirgard : le déterminisme se réduit à une approximation statistique ! les composants ultimes "communiquent" peut-être entre eux en ignorant les distances, font partie d'une même réalité holistique dès qu'ils se sont rencontrés, ce qui fut le cas de tous au moment du Big-Bang ! La structure intime du monde apparaît aujourd'hui tellement plus complexe qu'on ne l'imaginait il y a cent ans, que l'hypercomplexité et ubiquité que l'on se sent contraint d'attribuer à un "Être Créateur" ne paraît plus aussi inacceptable.

- Autrement dit, coupa Robin, plus on constate que c'est compliqué, plus il est facile d'imaginer que ça peut l'être plus encore. Je préfère ne pas vous suivre dans ce dédale qui nous mène à coup sûr dans les sables mouvants, et puisque vous vous plaisez à me coller des étiquettes, j'accepte volontiers celle supplémentaire de wittgensteinien, car j'aime son idée que philosopher, c'est finalement reconnaître l'obligation de se taire.

- Oui Robin, tu n'as pas tort, mais il est difficile de vivre taiseux, et surtout ça fait encore moins avancer que la question que d'avancer des idées contestables en acceptant de les mettre en débat. Si j'essaie de mieux t'expliquer ma propre attitude en ce domaine, je te dirai avec beaucoup d'humilité que je suis probablement à classer dans une secte, celle de la "pensée religieuse quantique", celle de ceux qui vivent écartelés entre la rigueur logique de leur pensée enrichie par la science et l'émerveillement voltairien horloger qu'ils ne peuvent s'empêcher de ressentir devant l'exubérance de la nature, l'extravagante biodiversité, son inconcevable complexité organisée et l'émergence de la pensée de cette complexité. Comment mettre tout cela sur les épaules de Darwin et l'expliquer seulement par le hasard et la nécessité sans être tenté d'appeler à la rescousse l'idée de finalité, qui, elle, semble échapper à notre logique qui ne manipule que la causalité ? Je qualifie par plaisanterie cette attitude de "quantique" parce qu'elle permet la coexistence dans mon esprit du scepticisme dont la logique colore la plupart des dogmes religieux et le doute que cette seule logique puisse expliquer toute la complexité de ce monde sans faire appel à l'idée de finalité qui ne fait pas partie de l'outillage de cette logique. C'est un peu comme un chat de Schrödinger à la fois vivant et mort dans ma boîte crânienne.

- Bon, j'entrevois cette dichotomie de l'esprit et je quitte le terrain des religions, mais ne vais pas me taire complètement, persévéra Robin, et je réfléchis plutôt à des conséquences plus terre à terre de la science moderne : j'ai bien noté que le nombre de fermions n'avait pas changé depuis qu'ils ont été créés quand l'univers était encore dans ses langes, donc nous qui sommes faits de fermions sous forme de protons, de neutrons et d'électrons, sommes des produits de recyclage réutilisant des fermions existant depuis les débuts du monde et qui ont déjà servi maintes fois.

- C'est certain, Robin, déjà notre soleil est un soleil d'occasion ; il n'a pas été fourni par Dieu à l'état neuf ; cela faisait déjà une bonne dizaine de milliards d'années qu'il existait un marché des fermions d'occasion lorsqu'il a été construit avec des atomes de récupération des produits de l'explosion d'étoiles plus anciennes, et la Terre a récupéré pour sa formation les atomes plus lourds qui traînaient alentour pour compacter en boule toutes ces poussières de corps simples plus denses ayant cuit dans le cœur de ces grosses étoiles avant qu'elles n'exploient et au cours de leur explosion.

Nous sommes donc bien des produits de recyclage de la matière universelle ; ceux qui, comme Hubert Reeves, veulent y mettre un brin de poésie disent que l'homme est de la poussière d'étoiles.

Ce qui peut être amusant à considérer est le recyclage interne, je veux dire par là le recyclage des noyaux d'atomes existant sur notre planète Terre depuis sa formation. Tout

ce qui y existe actuellement, particulièrement tout ce qui y vit, est construit avec des protons et neutrons ayant déjà servi pas mal de fois, sans parler des électrons qui sont les plus baladeurs en sautant d'un noyau d'atome à un autre au gré des réactions chimiques.

Le corps d'un homme comporte 3 à 4. 10^{28} atomes, qui sont d'ailleurs renouvelés plusieurs fois au cours de la vie ; ce nombre est très supérieur au nombre total des hommes ayant vécu sur Terre depuis qu'ils existent, qui doit être plutôt de l'ordre de 10^{10} ou 11 , et il n'est donc pas absurde de penser que dans le corps de Robin traînent quelques protons ayant servi à Voltaire, d'autres à Epicure et d'autre encore à un homme de Cromagnon, dans celui de Noël des protons d'occasion déjà utilisés par Jésus ou par l'âne de la crèche; peut-être ai-je récupéré quelques atomes de Pascal ou de Démocrite en même temps que ceux d'un galérien, et peut-être Grisella exploite-t-elle quelques protons ou électrons de Cléopâtre et d'autres des fruits qu'elle allait manger dans la coupe où le serpent l'a mordue.

Ce n'est pas idiot, car entre 10^{10} et 10^{28} , il y a beaucoup de place pour y mettre des protons et des électrons de quelques ancêtres, et aussi beaucoup d'autres ayant déjà servi à des dinosaures, à des arbres de la forêt primitive, à des ammonites de la mer initiale, à des laves du centre de la terre ayant émergé dans les volcans d'Auvergne, de l'eau du déluge...etc. Vous pouvez rêver cette nuit à beaucoup d'autres participations à l'arbre généalogique de votre "moi".

La matière ignore la mort, ses composants étant simplement réutilisés dans d'autres assemblages, d'autres structures. Seules les structures sont mortelles. La mortalité ne commence qu'avec la mise en forme, la mort est seulement la fin d'une forme particulière. Ce n'est qu'au niveau le plus élémentaire du proton et de l'électron que l'on trouve l'immortalité, car déjà les assemblages les plus simples se font et se défont par échanges d'électrons entre molécules dans des réactions chimiques qui préservent cependant l'identité des noyaux d'atomes ; ce sont les transformations les plus courantes, mais ces noyaux eux-mêmes ne résistent pas à l'assaut des rayons cosmiques ou des désintégrations nucléaires. Seuls se retrouvent toujours identiques à eux mêmes les immortels protons et électrons.

- Si on extrapole cette idée de mortalité des structures, avança Noël, à la structure la plus complexe que l'on connaisse, le cerveau, où semble résider l'esprit et qui est manifestement supporté par toute la structure physique du corps, on risque d'induire que l'esprit meurt avec le corps, ce qui est une extrapolation bien affligeante. Je voudrais que ce ne soit qu'une extrapolation hasardeuse car seules les structures ont de la personnalité et de la valeur ; quelle est la valeur de protons et d'électrons tous identiques, comparée à celle de l'esprit ?

- Peut-être pas si hasardeuse que cela, coupa Robin sarcastique, je ne sais plus quel positiviste a écrit que le cerveau secrète la pensée comme le rein secrète l'urine. Quand on voit le gâtisme envahir progressivement l'esprit de certaines personnes âgées en même temps que leurs reins les lâchent, on est tenté d'y croire.

Noël réagit avec vivacité :

- Je préfère l'idée platonicienne d'un monde de l'esprit lié un peu moins étroitement au corps, et même, pourquoi pas, l'idée bouddhiste d'un esprit qui se réincarne dans un autre corps lorsque ce dernier réunit les conditions favorables pour l'accueillir. Je me fais tout de même une plus haute idée de l'esprit que celle d'un sous-produit banal d'un organe quelconque, en songeant qu'il a fallu des milliards d'années d'évolution pour émettre une pensée, ou tout au moins une pensée qui laisse des traces. On croit tout de même distinguer dans ce lent processus une sorte de finalité privilégiant l'esprit par rapport à la matière.

- Vous retrouverez toujours les deux écoles, arbitra Kirgard, ceux qui pensent causalité et expliquent le "comment", et ceux qui pensent finalité et cherchent le "pourquoi". Les premiers vous expliqueront qu'au fil du temps, le monde brûlant et homogène des premiers instants, ennuyeux dans son excès de symétrie, a pu évoluer, grâce aux brisures successives de cette symétrie accompagnant le refroidissement, vers un monde enrichi de la liberté acquise

par les particules de s'accoupler les unes aux autres pour former des structures plus complexes : atomes, molécules, cellules, êtres vivants, dans une exubérante liberté gérée seulement par le hasard des rencontres. Dans cette vision darwinienne qui est aussi celle de Jacques Monod, la pérennité des structures mises à l'essai est assurée par leur aptitude à survivre parmi les nombreuses autres structures plus ou moins ratées, les mieux adaptées gagnant le droit à la reproduction pour un certain nombre de siècles ou millénaires, jusqu'à ce que certaines conditions extérieures aléatoires changent et tuent les dinosaures, ou que d'autres structures ayant évolué différemment commencent à les gêner, ce que commence à faire l'homme actuellement vis-à-vis de certaines espèces et de lui-même.

Pour les tenants de cette école, la multiplication des structures et les rencontres de hasard entre ces structures déjà complexes ont conduit de manière naturelle, en ne faisant appel qu'aux seuls mécanismes de la causalité et du hasard, à l'homme primitif, puis à l'homme pensant capable de se poser des questions sans réponse.

Les seconds, qui pensent finalité, changent de vocabulaire : ce que les premiers appellent évolution par causalité et hasard, ils la nomme évolution par finalité. L'univers portait dès son début le germe de l'homme et son évolution est téléguidée par un objectif lointain, qui actuellement prend la forme de l'homme et de son esprit, cet homme pensant pouvant lui-même s'améliorer encore dans les siècles et les millénaires à venir pour tendre vers une sorte de Point Oméga de Teilhard de Chardin. C'est le principe anthropique.

Cette école, qui redonne une place centrale à l'homme, ne s'appuie pas seulement sur les bases classiques de l'anthropocentrisme ayant eu cours pendant les deux derniers millénaires, mais sur les acquis scientifiques de ce dernier siècle qui concluent à une extrême improbabilité du monde où nous vivons, qui n'a pu se développer vers son état actuel qu'au prix d'interventions de caractère finaliste tant les obstacles à une évolution favorable semblaient infranchissables.

La liste de ces obstacles est impressionnante et commence dès le premier millième de seconde : si l'égalité entre les nombres de quarks et d'antiquarks n'avait pas été très légèrement faussée, les deux populations créées se seraient totalement annihilées et la création ne serait que rayonnement, sans matière.

Les conditions initiales et les valeurs des paramètres intervenant dans la physique semblent avoir été choisies avec un soin extrême pour que ce monde soit viable:

- On constate aujourd'hui que la densité de l'univers n'est peut-être pas égale à la densité critique qui lui assurerait un avenir plat entre continuation de l'expansion et contraction vers un Big Crush, mais elle n'en semble éloignée que d'un ou deux ordre de grandeur, or l'expansion est un amplificateur puissant de toute différence entre cette densité réelle et la densité critique, cet écart est proportionnel au temps écoulé depuis le Big-Bang: $(1 - d_{réelle} / d_{critique} = k.t)$. Comme l'univers est âgé d'environ 10^{17} secondes, cela signifie que l'expansion qui a conditionné l'écart entre la densité réelle et la densité critique lorsqu'il avait 1 seconde a du être réglé avec une précision de l'ordre de 10^{-17} ⁵⁰. Si l'expansion initiale avait été très légèrement plus faible, l'univers se serait déjà effondré sur lui-même par compression gravitationnelle ; si elle avait été très légèrement plus forte, la condensation gravitationnelle aurait été insuffisante pour former des étoiles⁵¹. La densité initiale de l'univers au temps de Planck a du être réglée avec une précision encore plus grande de 10^{-60} , ce qui représente la précision d'un tireur atteignant une cible de 1 cm² aux confins de l'univers⁵².

⁵⁰ **Maurice Jacob** *Au cœur de la matière* p 258 **Odile Jacob 2001**

⁵¹ **Stephen Hawking** *Une brève histoire du temps* p158 **flammarion 1993**

⁵² **Matthieu Ricard, Trinh Xuan Thuan** *L'infini dans la paume de la main* p65 **Fayard 2000**

- Si la différence de masse entre le proton et le neutron n'était pas environ le double de la masse de l'électron, les quelque 200 corps simples stables qui forment la base de la chimie et de la biologie n'auraient pu voir le jour⁵³.
- Si la masse du proton était sensiblement différente de ce qu'elle est, les étoiles n'auraient pu se former, donc ces corps simples qui se sont développés dans le cœur des étoiles par synthèse nucléaire n'auraient pu se créer⁵⁴.
- Si la force électrique qui lie les électrons aux protons du noyau était un peu plus forte, les réactions chimiques seraient très réduites, et la vie, pour autant qu'elle ait pu naître, n'aurait pas eu le temps d'évoluer avant l'extinction du soleil.
- Si la charge de l'électron n'était pas très exactement égale et opposée à celle du proton, les atomes ne seraient pas neutres et se repousseraient : il ne pourrait exister de molécules, et compte tenu de la faiblesse de la force gravitationnelle par rapport à la force électrique, aucune étoile ou planète ne serait stable.
- Plus près de nous, si la Terre était très légèrement plus proche du soleil, les océans se seraient évaporés, laissant une surface désolée inapte à la vie ; si elle était légèrement plus éloignée, notre Terre se serait couverte de glace également inapte à la vie.

Ces conditions si propices à notre existence sont-elles les indices d'une finalité ou le fruit du hasard et de coïncidences ? Au moins pour certaines d'entre elles, elles sont probablement le reflet de l'insuffisance de nos connaissances. Lorsque les physiciens auront fait un pas de plus vers la théorie de "Grande Unification", il sera probablement clair que le proton et l'électron sont deux faces d'un même "objet" pas encore nommé, et que leurs charges électriques sont donc nécessairement égales. Cette exacte égalité de charge ne sera alors pas plus une coïncidence que le fait que la Seine passe exactement sous les 365 ponts qui l'enjambent⁵⁵. Une apparente coïncidence révèle souvent une étroite relation passée jusqu'alors inaperçue.

Les objections à une évolution gérée par le hasard s'amplifient lorsqu'on entre dans le domaine du vivant ; l'œuf semble vraiment porteur d'une finalité : au cours du développement embryonnaire, la différenciation d'organes qui sont absolument invisibles au départ prends place selon un projet, visant à une fin. Dans un embryon de vertébré tétrapode, si on enlève un tibia, il se régénère suivant le même plan, si on en greffe un supplémentaire, il disparaît. Le mécanisme de la cause et de l'effet semble s'effacer et on ne peut guère éviter d'utiliser un langage finaliste pour décrire les processus de la vie qui évoquent davantage une finalité qu'une causalité.

Les biologistes comme Jacques Monod qui trouvent au terme de finalité un relent de théologie l'ont appelé téléologie ou téléomorphie, ce qui est une reconnaissance de fait qu'il y a quelque difficulté à rendre compte des phénomènes du vivant par le seul mécanisme du hasard et de la nécessité, et implique par ce vocabulaire que l'être vivant est programmé en vue d'une fin.

Ceux qui se cramponnent au darwinisme maintiennent que ce qui semble tendre vers un but par des adaptations successives n'est que le résultat d'une sélection de la vie parmi les mutants, qui confère à l'évolution du vivant l'apparence de la finalité. Mais les finalistes établissent des simulations informatiques sur la probabilité de passer de l'amibe à l'homme par le seul jeu du hasard et de la sélection, et la trouvent absurdement faible.

- Mais où est donc la finalité d'une évolution anthropique qui va s'arrêter dans cinq milliard d'années avec l'usure de notre soleil ?, railla Robin. Je sens qu'on va bientôt trouver le coupable, car si on suit la démarche classique en cherchant à qui profite le crime, tout ce

⁵³ **Stephen Hawking** *Commencement du temps et fin de la physique p55 flammariion 1997*

⁵⁴ **Stephen Hawking** *Commencement du temps et fin de la physique p55 flammariion 1997*

⁵⁵ **Stephen Hawking** *Commencement du temps et fin de la physique p35 flammariion 1997*

que vous venez de dire tend à montrer qu'il profite à l'homme qui se délecte sans fin de cette enquête qui l'amène à chercher d'où il vient, où il va, et pourquoi il y va, sans trouver de réponse incontestable. Heureux les animaux qui ne se posent pas de telles questions ! Que j'aimerais être une vache broutant paisiblement l'herbe du pré!

- Excusez-moi messieurs, d'interrompre ce débat dont l'issue est certainement incertaine, osa Grisella, mais il me semble que l'orage est passé et que la pluie nous a quittés, je crois même deviner des étoiles à travers la vitre. Je vous demande congé et vais faire un tour sur la terrasse voir ce que devient le temps.

8

ce soir essayons de voir dans le noir

Après quelques instants d'hésitation, les trois hommes suivirent Grisella sur la terrasse où cette fin de soirée n'avait plus rien de commun avec son début, la voûte du ciel avait déjà retrouvé sa limpidité et ruisselait de toutes ses constellations.

- Quel regard allons-nous jeter sur ce ciel étoilé inattendu? avança Noël d'un ton mi-ironique, mi-provoquant, y chercher de la beauté? Inutile, elle ne frappe que ceux qui la voient sans la chercher, s'angoisser face cette grandeur sans commune mesure avec l'homme est également inutile puisqu'on est sûr de s'épuiser sur le sujet, ou adopter le regard indifférent de ma grand-mère? Pourquoi s'intéresser à ce plafond où tout ce qui s'y passe n'interfère pas avec notre vie quotidienne, ou y interfère de façon si coutumière, par les jours, les nuits et les saisons, qu'on peut l'oublier.

- Pourquoi des regards chargés de sentiments, rétorqua Grisella, besoin de beauté, angoisse existentielle. Lever la tête vers le ciel est simplement l'occasion d'y constater calmement ce que nous en savons, sans pour autant tomber encore dans les désespérances de la compréhension intime dans laquelle le professeur a failli tomber ce soir.

Jusqu'au vingtième siècle, on n'a connu le ciel que par les yeux comme nous ce soir, certes améliorés par les télescopes, et seulement depuis la terre à travers son atmosphère un peu trouble. Maintenant qu'on regarde depuis les satellites sans être gêné par l'atmosphère, et pas seulement par les yeux, mais aussi dans des bandes de fréquences où l'œil ne voit rien, radio, X ou gamma, on découvre un bestiaire incroyablement divers de corps célestes, et on soupçonne encore beaucoup plus d'invisible que de visible.

Je préférerais qu'on lise calmement le ciel, et ne laisser s'ouvrir la boîte à sentiments qu'ensuite. Notre curiosité doit être calme et refouler aussi bien l'angoisse que l'émerveillement et en ne nous laissant frôler que par l'étonnement.

- Ta sagesse m'étonnera toujours, Grisella, jugea Kirgard. Quand tu parles de plus d'invisible que de visible, cela veut-il dire que tu as envie de deviner ce qui se passe dans les trous noirs et ce que pourrait être cette matière sombre que nous avons évoquée dans notre première soirée?

- Entre autres créatures bizarres de ce bestiaire, oui, on n'en a effectivement parlé que de manière allusive et intrigante avant-hier soir, plutôt comme d'hypothèses, sans s'y attarder. Que pouvez-vous nous dire de plus sur tous ces corps noirs célestes invisibles ?

- Méfiez vous d'abord du qualificatif "noir", car il y a bien d'autres corps célestes invisibles que la matière dite sombre et les trous dits noirs, à commencer tout simplement par les planètes. Nos télescopes ne permettent de voir que les planètes de notre petit système solaire qui sont suffisamment proches et suffisamment éclairées par notre propre soleil pour être aperçues, mais comment imaginer que les milliards d'autres soleils éloignés, d'abord dans notre propre galaxie, puis dans les milliards d'autres galaxies ne sont pas munis eux aussi de planètes qu'actuellement aucun télescope ne permet de déceler à cause de leur éloignement, de leur taille réduite et de leur faible éclairage ? dans notre propre voie lactée nous concluons déjà que certaines étoiles ont des satellites, à cause de la légère perturbation qu'ils apportent au mouvement de ces étoiles, sans pour autant voir ces satellites. On commence à les dénombrer, et on en a identifié quelques dizaines avec certitude, mais leur nombre va certainement exploser dans les prochaines années avec les observations de Hubble et du très grand télescope européen installé dans les montagnes du Chili où le ciel est plus clair.

- Et sur tous ces milliards de milliards de petites planètes possibles, ce serait bien le diable si beaucoup d'entre elles ne réunissaient pas des conditions propices au développement de la vie sous des formes qui leur sont propres, ricana Robin, ce qui relativise singulièrement l'homme qui attache tant d'importance à lui-même.

- Certes, Robin, mais tu perds déjà le calme du regard, alors n'allons pas plus loin sur ce terrain pour le moment, car nous entrerions dans le domaine de la science-fiction et retournerions dans celui de la philosophie, et puisque Grisella semble plutôt intéressée par les grandes masses noires, laissons tomber en première approche ces myriades de planètes invisibles qui ne peuvent constituer qu'une assez faible masse globale comparée à la masse de leurs soleils respectifs, et regardons du côté des cadavres d'étoiles, car les corps noirs massifs identifiés jusqu'alors sont tous des cadavres d'étoiles, ce qui nous oblige à revoir d'abord ce que sont la naissance, la vie et la mort d'une étoile, avec un peu plus de détails qu'avant-hier soir, ce qui est ce soir plus facile après les révisions de connaissances auxquelles nous venons de procéder sur la matière, la relativité et la physique quantique, qui vont nous aider à faire un peu d'astrophysique.

- Je sens qu'on va faire des travaux dirigés ! dit Grisella.

- Donc vous savez déjà qu'il traîne dans l'espace des atomes d'hydrogène, formant des nuages très dilués, mais gigantesques car ils peuvent s'étendre sur des dizaines d'années-lumière. Ces nuages sont parsemés de poussières d'autres atomes un peu plus complexes résultant d'explosions d'étoiles préexistantes qui ont perdu ainsi leurs couches périphériques et expulsé au loin ces matériaux dans l'espace. Il arrive que ces poussières et gaz se rassemblent par attraction gravitationnelle, et ce nuage d'atomes se compacte progressivement en une boule de matière qui s'échauffe par l'entrechoquement des particules qui se précipitent les unes contre les autres sous l'action de la gravitation.

En quelques centaines de millions d'années de compactage, ces gigantesques quantités de matière qui traînaient dans l'espace deviennent si comprimées que la température y atteint des millions de degrés. Dans ces conditions de densité et de température, les électrons et les protons de l'hydrogène se séparent et forment un plasma ; les protons peuvent fusionner pour former des éléments plus lourds comme l'hélium, en libérant de l'énergie : c'est la fusion nucléaire, où la masse des noyaux fusionnés est très légèrement inférieure à la masse des noyaux avant fusion (0,7% au passage de l'hydrogène à l'hélium), petite destruction de masse qui s'exprime extérieurement par une gigantesque production d'énergie, par application de la loi d'Einstein $E = m.c^2$. Cette énergie s'ajoute à

l'échauffement de compression gravitationnelle et l'étoile s'allume, continuant à consommer son hydrogène en le transformant en hélium.

Mais " tout étant pour le mieux dans le meilleur des mondes ", le soleil n'explose pas comme une bombe H car ce n'est pas ici une fusion nucléaire non contrôlée, et ce que les hommes n'ont pas encore réussi à réaliser, c'est-à-dire la fusion contrôlée de l'hydrogène, la nature le fait en permanence dans les étoiles : le dégagement de cette énorme énergie de fusion nucléaire ralentit l'effondrement gravitationnel de cette masse de matière et la stabilise pour longtemps. Un équilibre s'établit entre l'attraction gravitationnelle qui tend à comprimer encore l'étoile, et la poussée du rayonnement d'énergie qui tend à la faire exploser en bombe thermonucléaire. La fusion est contrôlée, l'étoile consomme tranquillement son combustible hydrogène et brille tant que celui-ci n'est pas épuisé.

- Ouais ! on avait déjà lu que notre soleil est né comme cela il y a quatre à cinq milliards d'années, dit Robin.

- 4,6 milliards d'années, en effet, et il va fonctionner encore pendant 4,5 milliards. Si vous êtes intéressés par plus de détails concernant cette réaction de fusion thermonucléaire contrôlée, je vous invite à utiliser vos connaissances rafraîchies par nos conversations d'hier et vous allez y trouver une application directe du principe d'incertitude d'Heisenberg.

En effet, comment faire fusionner ensemble les protons de deux atomes d'hydrogène qui ont tous deux une charge électrique positive, et donc se repoussent ? Il faut sauter cette barrière répulsive de la force électromagnétique et rapprocher suffisamment les deux protons pour que la force "forte", dont vous savez qu'elle est beaucoup plus grande que la force électromagnétique mais ne s'exerce qu'à très faible distance, l'emporte et puisse jouer son rôle de colle en maintenant soudés les deux protons malgré leur répulsion électrique.

Ce rapprochement forcé serait possible si la température du plasma était beaucoup plus élevée, de l'ordre des milliards de degrés, car l'énergie cinétique d'agitation des protons serait alors assez grande pour qu'ils se frôlent de si près que les gluons de l'interaction "forte" puissent les engluier au passage, mais la température du centre de notre soleil n'atteint que 15 millions de degrés et l'énergie cinétique moyenne des protons est insuffisante ! C'est là qu'intervient le principe d'incertitude d'Heisenberg et que l'on retrouve l'effet tunnel : grâce au principe d'incertitude, certains protons empruntent temporairement au vide quantique le complément d'énergie qui leur manque pour franchir la barrière électromagnétique et réussissent ainsi à s'approcher si près d'un autre proton qu'ils y restent collés par la grâce des gluons de la force forte.

Si vous voulez connaître la suite, elle est du même style : pour rendre plus stable ce PACS homosexuel, la force "faible" vient à la rescousse en transformant un des protons en neutron, faisant disparaître toute velléité de répulsion, transformant le PACS homo en mariage hétéro, avec production d'un neutrino qui s'échappe discrètement, et d'un positon qui se cogne immédiatement contre un des nombreux électrons du plasma et s'annihile dans le choc contre son antiparticule en émettant un puissant photon gamma. Mais ce nouveau noyau (le deutéron, noyau de l'hydrogène lourd), se cognant contre la nuée des autres protons et le principe d'incertitude intervenant à nouveau, un mariage à trois se produit : 2 protons + 1 neutron, donnant un noyau d'hélium3, puis deux noyaux d'hélium3 s'unissent pour former un noyau d'hélium 4 classique à 2 protons et deux neutrons, en rejetant les deux protons excédentaires qui peuvent réamorcer une autre cycle semblable. C'est ce qu'on appelle le cycle proton-proton.

A chaque étape de ce cycle, un photon gamma est émis et ces photons très énergétiques se fraient péniblement un chemin en zig-zag dans l'épaisse forêt du plasma d'électrons qui les dévient sans cesse puisque les photons sont sensibles à la force électromagnétique. Ils ont à traverser les 700.000 kilomètres de rayon du soleil dans des régions de moins en moins chaudes avant d'émerger péniblement au bout de plusieurs centaines de millions d'années à 6000 degrés sur la surface du soleil, en ayant perdu beaucoup de leur énergie dans ce slalom, donc allongé leur longueur d'onde, et partent alors pour un voyage de 8 minutes vers la terre sous forme d'un rayon de soleil d'une belle lumière blanche plus propre à y développer la vie que les photons gamma initiaux qui auraient tout ravagé s'ils avaient gardé leur énergie initiale. On retrouve là encore de la philosophie "Pangloss".

Les neutrinos formés aux diverses étapes du cycle proton-proton s'échappent beaucoup plus rapidement de la masse solaire car ils ne sont sensibles qu'à l'interaction faible et les rencontres sont beaucoup moins nombreuses, deux secondes leur suffisent.

- Je me sens plus savante qu'hier, et heureuse de constater que les connaissances de physique fondamentale nous servent à quelque chose.

- Tu en doutais, Grisella ? Pour être complet sur le processus de naissance des étoiles, ajoutons que les poussières les plus lourdes, formées d'éléments plus composés que l'hydrogène et l'hélium, gravitent à la périphérie de l'étoile récemment formée, et se rassemblent peu à peu en gravillons, puis en cailloux, puis en astéroïdes, sous l'action principale de l'attraction électromagnétique, car ils sont encore trop petits pour que l'attraction gravitationnelle joue un rôle important, ce qui leur permet des formes biscornues encore visibles dans les astéroïdes ; puis au cours de leur croissance ensuite plus lente car il

y a moins de rencontres dans le ciel, la force d'attraction gravitationnelle l'emporte peu à peu sur la force électromagnétique, et au bout d'une centaine de millions d'années, toutes ces poussières agglomérées finissent par s'arrondir en boules et mériter le nom de planètes.

Revenons au centre de ces systèmes planétaires pour suivre ce que devient l'étoile centrale au cours de sa vie limitée. Elle brûle son stock d'hydrogène en le transformant en hélium et, pour 0,7% seulement, en énergie rayonnante dont elle arrose les planètes qui l'entourent pendant plusieurs milliards d'années, les brûlant ou les congelant selon la distance, pouvant éventuellement y développer de la vie si la distance et beaucoup d'autres facteurs y sont favorables. Mais son stock d'hydrogène n'étant pas infini, elle parvient à l'épuiser au bout d'un temps qui dépend beaucoup de sa taille initiale, variant de quelques dizaines de millions d'années pour les plus grosses à quelques dizaines de milliards d'années pour les plus petites, car paradoxalement ce sont les étoiles qui disposent du plus gros stock d'hydrogène qui meurent le plus vite

En ce qui concerne notre soleil, il a consommé la moitié de son stock d'hydrogène et va continuer à briller pendant encore 4,5 milliards d'années.

Voyons maintenant la fin de vie des étoiles.

- Il va y avoir de l'hémoglobine ! on va peut-être avoir enfin un vrai crime et savoir ce qu'on cherche, gouailla Robin.

- Plutôt du four crématoire que de l'hémoglobine, corrigea Kirgard. Voilà le scénario actuellement admis : d'abord, les étoiles perdent une grande partie de leur masse tout au long de leur vie, bien sûr par rayonnement, mais surtout par le "vent stellaire", qui est une expulsion directe d'électrons et de protons guidés par le champ magnétique de l'étoile qui leur permet d'échapper à son attraction gravitationnelle et de fuir à une vitesse de plusieurs milliers de kilomètres par seconde vers l'espace interstellaire où ils forment des nébuleuses planétaires. Outre cette cure d'amaigrissement commune à toutes, la durée de vie des étoiles et leur sort en fin de vie dépendent essentiellement de leur masse initiale.

Les petites étoiles ont une température centrale plus basse, leurs réactions thermonucléaires sont plus lentes et leur durée de vie plus longue. Lorsque notre soleil, qui appartient à cette catégorie, commencera à épuiser sa réserve d'hydrogène, le cycle proton-proton se ralentira car il y aura alors beaucoup plus d'hélium au centre que d'hydrogène, qui maintiendra en périphérie les dernières fusions nucléaires en se dilatant jusqu'à 100 fois son diamètre actuel, absorbant Mercure et Vénus ; la température de surface baissera et le soleil deviendra une géante rouge pendant environ 1 milliard d'années, mais le cœur d'hélium continuera à se contracter en s'échauffant vers 100 millions de degrés, où un nouveau cycle de réactions nucléaire peut prendre naissance avec fusion de trois atomes d'hélium pour former du carbone 12, puis de l'oxygène avec un quatrième atome d'hélium.

Ce cycle est plus brutal et ne durera que quelques centaines d'années, on l'appelle le flash de l'hélium, qui dilate à nouveau le cœur, puis les couches extérieures se dispersent dans l'espace pour former une nébuleuse planétaire pendant qu'au cœur, la diminution de la pression de rayonnement ne permet plus de contrebalancer la compression gravitationnelle et l'étoile s'effondre sur elle-même.

Pour les étoiles d'une taille voisine de celle de notre soleil, disons jusqu'à 1,4 fois sa masse, cet effondrement est limité à environ un centième de la taille initiale par la résistance du gaz d'électrons qui s'agitent dans le plasma du cœur de l'étoile à plus d'une dizaine de millions de degrés, électrons qui, comme nous l'avons rappelé hier, sont des fermions et obéissent donc au principe d'exclusion de Pauli qui ne permet pas de faire chevaucher leurs territoires respectifs ; ils résistent donc à la compression gravitationnelle, et le nouvel équilibre entre les électrons et la gravitation transforme l'étoile initiale en une toute petite étoile de quelques milliers de kilomètres de diamètre, donc du même ordre de grandeur que notre terre, mais d'une densité inimaginable d'une dizaine de tonnes par centimètre cube. On l'appelle alors naine blanche, parce qu'elle continue à rayonner de la lumière blanche pendant quelques milliards d'années.

La masse M_b de la naine blanche est liée à la masse initiale M de l'étoile (en nombre de fois la masse de notre soleil) par la relation approximative $M_b = 0,45 + 0,1 M$. Mais le rayonnement de la naine blanche l'épuise car elle ne dispose plus de ressources d'énergie suffisantes pour maintenir sa température, elle se refroidit, sa lumière vire progressivement au rouge sombre ; elle devient une naine brune comme sont toutes les petites étoiles ne dépassant pas 20% de la taille du soleil et dont la température de surface n'est que d'environ 3000 degrés, puis naine noire, rejoignant le cortège des milliards de milliards d'étoiles défuntées ou bien avortées car trop petites pour avoir été capables d'allumer le feu nucléaire. Elles constituent alors une partie de ce monde invisible de la matière noire.

Et Robin émit d'une voix caverneuse un sonore « de profundis ».

- Les étoiles un peu plus grosses ont un sort différent. Entre 1,4 et 3 fois la masse de notre soleil, la température centrale de l'étoile est naturellement plus élevée à cause de la compression gravitationnelle plus forte ; cette fois, leur effondrement gravitationnel ne peut plus être stoppé par les électrons centraux dont la résistance est insuffisante contre cette énorme force de gravitation. Mais comprimer à l'extrême ces électrons revient à mieux fixer leur position, et le principe d'incertitude dit alors

que leur quantité de mouvement augmente, accroissant leur énergie cinétique qui devient suffisante pour pénétrer les noyaux d'hélium et neutraliser leurs protons en les transformant en neutrons. Une grande partie des électrons s'étant suicidés dans cette "neutronisation" des protons, une seconde ligne de résistance s'établit alors avec ces neutrons qui eux aussi obéissent au principe d'exclusion de Pauli, mais sont de taille beaucoup plus petite que celle des orbites électroniques, donc l'équilibre s'établit lorsque les restes de l'étoile sont réduits à une minuscule sphère d'une ou deux dizaines de kilomètres de rayon appelée étoile à neutrons, d'une densité extravagante de plusieurs centaines de millions de tonnes par centimètre cube qui est celle d'un noyau atomique, et que Trinh Xuan Thuan image en disant qu'elle correspond à un milliard d'éléphants dans une cuiller à soupe⁵⁶. La gravité à la surface d'une étoile à neutrons y est un milliard de fois plus forte que sur Terre.

Ces étoiles à neutrons qui rassemblent une masse énorme sur un tout petit diamètre tournent sur elles-mêmes à des vitesses prodigieuses, jusqu'à plusieurs centaines de tours par seconde, car elles ont conservé la quantité de mouvement de rotation de l'immense étoile initiale ; elles possèdent aussi un champ magnétique titanesque, car elles ont aussi conservé le flux magnétique global de l'étoile initiale dans un diamètre extrêmement réduit, augmentant le champ dans le même rapport. Ce champ magnétique gigantesque, joint à la rotation rapide, canalise un flux d'électrons résiduels qui s'échappent par les pôles à des vitesses relativistes. Courbés par le champ magnétique, ces électrons émettent un rayonnement de lumière synchrotron, comme celui qui sort des accélérateurs synchrotrons à électrons tels que l'ESRF de Grenoble. Comme l'axe des pôles magnétiques ne coïncide pas forcément avec l'axe de rotation, ce rayonnement clignote sous forme de deux pinces lumineuses qui tournent à la vitesse des étoiles à neutrons, qu'on appelle aussi pour cela pulsars (de pulsating stars), découverts en 1982. Cette "lumière" est en fait surtout riche en rayons gamma invisibles à l'œil, car elle est puissamment alimentée par la gigantesque énergie d'effondrement de l'étoile.

Ce sont les plus grosses étoiles qui connaissent le sort le plus noir. Lorsqu'elles dépassent trois fois la masse solaire, leur température interne est encore plus élevée, dépassant vingt millions de degrés, toujours pour la même raison que la compression gravitationnelle y est plus forte encore ; elles brillent donc d'un éclat incomparablement plus vif et plus bleuté, plus brillantes qu'un million de soleils, car leur température de surface peut être de l'ordre de 100.000 degrés, mais elles consomment leur hydrogène à un rythme infernal, car elles ne suivent plus le cycle nucléaire proton-proton des étoiles moyennes, mais un cycle carbone-carbone plus complexe et plus gourmand en hydrogène, utilisant le carbone qui existe dans toutes les étoiles formées à partir des débris d'autres étoiles plus anciennes.

De la même manière que pour le cycle proton-proton, la compression gravitationnelle du plasma de protons rapproche ces derniers des noyaux de carbone; des protons cherchent à s'agglutiner au noyau de carbone, mais ceux-ci, composés de 6 protons et 6 neutrons présentent au proton une barrière répulsive de 6 charges électriques ; la force électromagnétique de répulsion est donc plus forte que celle du simple proton à une seule charge du cycle précédent proton-proton, mais les vingt à trente millions de degrés confèrent aux protons candidats à l'accouplement suffisamment d'énergie cinétique pour qu'avec l'aide du principe d'incertitude ce franchissement devienne possible. Je vous passe les détails du cycle qui transmute le carbone¹² en azote¹³ par l'ajout d'un proton, puis en carbone¹³ par transformation de ce proton en neutron, puis en azote¹⁴ par l'annexion d'un second proton, puis en oxygène¹⁵ avec un troisième, puis en azote¹⁵ par "neutronisation" de ce dernier proton, et enfin annexion d'un quatrième proton, ce qui régénère le carbone¹² initial qui n'a plus qu'à recommencer son cycle, et produit finalement de l'hélium⁴ provenant des protons de l'hydrogène consommé, comme dans le cycle proton-proton des étoiles moins chaudes, mais à un rythme accéléré et avec une production plus intense de photons gamma à chaque étape du cycle.

Les grosses étoiles grandes dévoreuses d'hydrogène ne vivent que quelques millions d'années ; leur combustible épuisé, les plus grosses d'entre elles explosent en supernova comme celle détectée en 1987 dans le grand nuage de Magellan, volatilissant dans l'espace leurs couches extérieures pendant que le cœur qui en constitue la masse principale s'effondre gravitationnellement sur lui-même ; mais cette fois l'effondrement ne peut être arrêté ni par les électrons, ni par les neutrons tant la force de gravitation est titanesque, et toute la masse de l'étoile effondrée tombe comme dans un puits sans fond, acquérant une densité telle que même la lumière, qui souvenez vous est sensible à la gravité, y tombe et ne peut s'en échapper. C'est le trou noir, et on ne peut plus savoir que l'étoile effondrée est là, toute communication est interdite par cette censure cosmique. Jacques Paul, astronome spécialiste des étoiles à neutrons et des trous noirs, définit en plaisantant le trou noir comme « un astre tellement compact qu'il retient tout, y compris la preuve de sa propre existence »⁵⁷

- C'est là qu'on va frôler la science-fiction, fit Noël d'un air appâté.

- On peut approcher le concept de trou noir à partir de celui de vitesse de libération : vous savez que pour satelliser une fusée autour de la Terre, il faut l'accélérer jusqu'à ce qu'elle atteigne une vitesse minimale de 8 kilomètres par seconde ; si on pousse jusqu'à 11 km/s, dite vitesse de libération la fusée échappe à l'attraction terrestre et part pour le cosmos. Cette vitesse de libération est d'autant plus grande que la masse de la planète est élevée et son diamètre petit, elle varie en $\sqrt{m/r}$.

Sur la lune, quelques centaines de mètres par seconde suffisent, sur un petit astéroïde quelques mètres par seconde vous envoient dans l'espace. Sur le soleil, par contre, la vitesse de libération serait de 617 km/s. Comme on sait depuis la Relativité Générale que la gravité agit aussi bien sur la lumière que sur la matière, on peut s'amuser à calculer pour une étoile d'une masse donnée quel devrait être son rayon pour que la vitesse de libération à sa surface dépasse 300.000 km/s qui est la vitesse de la lumière ; la lumière ne pourrait alors pas s'en échapper. L'étoile serait alors un trou noir.

Ce rayon, dit de Schwarzschild, est extrêmement petit comparé à celui des étoiles en fonctionnement. Pour notre soleil dont le rayon est de 700.000 kilomètres, il faudrait que toute sa masse soit comprimée sur un rayon de Schwarzschild de trois

⁵⁶ Trinh Xuan Thuan *Le chaos et l'harmonie* p230 Fayard 1998

⁵⁷ Jacques Paul *l'homme qui courait après son étoile* p85 Odile Jacob 1998.

kilomètres pour qu'il se transforme en trou noir. Même lorsque dans des milliards d'années, il se sera effondré en naine blanche, son rayon sera alors stabilisé à environ 6.000 kilomètres, de loin supérieur aux 3 kilomètres nécessaires pour devenir un trou noir qu'il ne sera donc jamais.

Mais pour les très grosses étoiles de plusieurs fois la masse solaire, il en va autrement et leur effondrement gravitationnel les amène en dessous du rayon de Schwarzschild ; la concentration de leur matière, et donc la force de gravité devient alors si forte que rien ne peut plus arrêter l'effondrement jusqu'au trou noir.

On n'a jamais pu observer ce qui se passe dans un trou noir à l'intérieur du rayon de Schwarzschild qui constitue une surface-horizon, barrière à l'extérieur de laquelle la lumière peut encore frôler le trou sans y tomber, mais à l'intérieur de laquelle on ne sait rien. Peut-être qu'en son centre toute la matière avalée aboutit à une "singularité" de 10^{-33} centimètre, terme prudent pour évoquer une densité qui deviendrait infinie.

Cela vous rappelle sans doute quelque chose, non ? La création de l'univers lors du big-bang n'a-t-elle pas eu lieu à partir d'une "singularité" de ce genre, où la notion d'espace-temps elle-même perd pied ?

Le trou noir se manifeste à l'extérieur à travers ses effets gravitationnels hyperpuissants ; les nuages interstellaires d'hydrogène et d'hélium s'y précipitent en tourbillonnant et en se densifiant, chauffés à des millions de degrés, formant un disque d'accrétion autour du "trou", disque qui illumine les abords du trou par un rayonnement sur toutes les longueurs d'onde, depuis les photons radio vers l'extérieur du disque jusqu'aux photons gamma au voisinage du trou, en passant par toutes les couleurs de l'arc-en-ciel visibles par l'œil vers le milieu du disque. C'est surtout par le rayonnement gamma de très haute énergie vers la partie interne de son disque d'accrétion que les trous noirs sont identifiés et repérés.

Les abords du trou sont fascinants, car leurs effets sur le temps sont encore plus stupéfiants que le paradoxe des jumeaux : en s'approchant de la barrière-horizon, l'hypergravité ralentit le temps, alors qu'il suit son cours normal sur Terre, et si un observateur pouvait se trouver au bord de cette barrière et communiquer encore avec la Terre, il verrait lui arriver des images accélérées sur leurs ondes électromagnétiques porteuses aspirées par la proximité du trou noir ; il verrait en quelques instants les années et les siècles futurs se dérouler sur terre, et, s'il était capable de s'arrêter exactement sur la barrière horizon, le temps se figerait pour lui et il pourrait contempler l'éternité.

- Grisella, voilà encore une information à passer à Jean d'Ormesson pour enrichir son surf sur le temps, dit Robin.

- À 30.000 années-lumière de nous, au cœur de notre propre galaxie lactée que vous avez sous les yeux, existe un trou noir d'une masse de 3 millions de soleils, résultant probablement de l'absorption de dizaines ou centaines de milliers de grosses étoiles défuntées qui ont peut-être formé d'abord des trous noirs plus modestes qui ont ensuite fusionné.

Plus impressionnants encore sont les trous noirs des confins de l'univers, au sein des quasars, à plusieurs milliards d'années-lumière de la Terre ; ces quasars qui nous amènent des images tardives de ce qu'était l'état de l'univers il y a des milliards d'années semblent être des galaxies en train de se faire dévorer par de gigantesques trous noirs centraux ayant des masses de l'ordre du milliard de soleils.

Pour se signaler par un puissant rayonnement gamma de leur disque d'accrétion, ces disques des trous noirs ont besoin d'être alimenté en matière. L'hydrogène et l'hélium sont à l'état très dilué dans l'espace, mais très concentré dans les étoiles ; aussi cette alimentation trouve-t-elle souvent son origine dans un mariage qui a mal tourné entre deux étoiles. La moitié des étoiles visibles est en effet constituée d'étoiles doubles tournant ensemble autour de leur centre de gravité commun ; si l'une des deux étoiles est très massive, elle meurt en quelques millions d'années en se transformant en trou noir, l'étoile la plus petite continuant à orbiter autour du cadavre de sa compagne, puis, vers la fin de sa vie, lorsqu'elle devient géante rouge, ses couches extérieures s'étendent jusqu'à proximité du trou noir dont le

champ gravitationnel puissant suce progressivement la substance de l'étoile encore en vie, qui s'épuise par ce vampirisme stellaire.

- C'est Dracula!, je savais bien qu'il y aurait de l'hémoglobine dans ce polar de série noire, ricana Robin.

- Tous ces astres effondrés invisibles à nos yeux, aux densités inimaginables, sont des produits de la science de la seconde moitié du vingtième siècle. Ce sont des astres "relativistes" et "quantiques", puisque seule la théorie de la relativité a permis d'en comprendre l'existence et la relation avec la lumière, et la physique quantique d'en analyser la naissance et l'évolution. Les puissances qu'ils mettent en jeu sont si disproportionnées avec celles que nous manipulons sur terre qu'elles sont inimaginables : une toute petite surface de 1 millimètre carré de la zone interne du disque d'accrétion d'un trou noir peut rayonner une puissance équivalente à 10.000 centrales nucléaires.

- Alors Grisella ! satisfaite de mieux connaître les horreurs qui se passent dans le noir ? persifla Robin.

- À vrai dire, j'ai été plus impressionnée par la diversité des phénomènes découverts dans le ciel que par les horreurs qui s'y produisent, car le terme d'horreur n'a plus guère de sens quand il s'agit d'événements aussi grandioses.

- Cette diversité est encore plus grande pour les planètes que pour les étoiles, qu'on a tout de même pu faire entrer dans un petit nombre de catégories selon les types de réactions nucléaires qui les entretiennent en fonction de leur taille, alors que la condensation des diverses poussières d'éléments lourds qui ont formé les planètes présente une diversité beaucoup plus grande selon la nature de ces poussières ou gaz, la distance de la planète à son étoile, sa gravité propre qui a pu ou non retenir une atmosphère, sa vitesse de rotation, l'orientation de son axe, les impacts qu'elle a pu subir de la part d'astéroïdes ou autres bolides sidéraux dont les plus gros ont pu faire basculer cet axe, et les propriétés de chaque planète se modifient avec le temps..

Il suffit de regarder notre propre système solaire pour observer cette diversité, notre Terre qui tourne sur elle-même en 24 heures tournait en 5 heures au début de son existence, et elle va continuer à ralentir à cause de l'énergie consommée par le phénomène des marées.

Les inclinaisons de l'axe de rotation de chacune des planètes par rapport au plan de l'écliptique sont assez variées : pour la Terre, elle est de 23,5°, ce qui apporte le charme des saisons, mais pour Uranus, elle est de 98°, et comme Uranus qui est très loin tourne autour du soleil en 84 de nos années terrestres, son pôle sud rôtit au soleil pendant 42 ans, puis gèle dans la nuit pendant les 42 ans suivants, le pôle nord subissant l'inverse.

Vénus a peut-être subi une collision encore plus violente car elle a franchement basculé de presque 180° et tourne la tête en bas, ce qui fait que le soleil s'y lève à l'ouest au lieu de se lever à l'est comme chez nous et comme sur la plupart des autres planètes.

Mars a actuellement un axe de rotation incliné de 25,2°, mais cet axe a oscillé dans le passé d'environ 10°, ce qui a conduit à des expositions trop longues à un soleil ardent et asséché les fleuves qui ont marqué sa surface.

Outre les impacts d'astéroïdes qui ont pu faire basculer ces axes, les astronomes pensent que la présence de gros satellites autour d'une planète joue un rôle stabilisateur de son axe de rotation. Mars qui n'est accompagné que de deux petits astéroïdes, Phobos et Deïmos, aurait peut-être connu ces instabilités d'axe par suite de cette absence de gros satellite.

- Nous avons la lune, interrompit Noël, est-elle suffisante pour assurer notre survie ?

- Oui, nous avons cette chance, et des astronomes du Bureau des longitudes ont fait une simulation du comportement de la Terre en l'absence de sa grosse lune ; le résultat est

terrifiant car il prédit des oscillations chaotiques de notre axe de rotation entre 0° et 85° sur quelques millions d'années, ce qui nous amènerait à la situation d'Uranus, c'est-à-dire à des conditions climatiques ne permettant pas la vie.

- Cela veut-il dire que c'est grâce à la lune si nous sommes là ? dit Robin.

- Probablement, la lune a permis l'émergence de la vie sur Terre en stabilisant son axe de rotation, qui n'a varié que de 1,3 degré sur 1 million d'années, très petite variation qui pourtant a probablement été suffisante pour être à l'origine des périodes de glaciation. C'est un aspect d'une profondeur insondable au plan philosophique ! Un événement accidentel comme la création de la lune par l'arrachement d'un morceau de notre terre sous l'impact d'un bolide, qui échappe à tout calcul, serait à l'origine de l'homme ?

- Eh Eh ! ironisa Noël, j'avais bien fait de vous rappeler hier soir les paroles de Saint Augustin : « la sagesse de Dieu échappe au calcul ».

- Ton Dieu est le champion des moyens détournés pour arriver à ses fins, ironisa Robin, ça ressemble plutôt à du hasard !.

- On n'a parlé que de l'inclinaison de l'axe de rotation, mais bien sûr il y a tant d'autres facteurs qui interviennent, la distance au soleil, l'existence et la nature de l'atmosphère... ; les petites planètes les plus proches du soleil, Mercure, Vénus, la Terre et Mars, ont toutes perdu leur atmosphère initiale, faite essentiellement d'hydrogène et d'hélium, dont les atomes surchauffés par la proximité du soleil ont acquis une agitation telle que leur énergie cinétique leur a permis d'échapper à la gravitation de leur planète et de s'envoler vers les régions extérieures du système solaire où ils se sont fait capturer par l'énorme gravitation des grosses planètes externes plus froides, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.

Les planètes les plus internes qui ont perdu leur atmosphère d'origine sont soumises à un cyclage thermique sévère entre le jour et la nuit : Mercure qui est trop près du soleil passe de 350°C le jour à -170°C la nuit, Vénus évolue entre 480°C et -33°C du jour à la nuit, dans une épaisse atmosphère reconstituée d'oxyde de carbone sous une pression 100 fois plus forte que la nôtre, balayée de nuages d'acide sulfurique, Mars est entouré d'une atmosphère reconstituée très ténue, presque entièrement composée de dioxyde de carbone.

Les planètes externes sont beaucoup plus lointaines, Jupiter, au delà d'un cœur minéral environ deux fois plus grand que la Terre, n'est qu'une grosse boule de gaz, essentiellement de l'hydrogène, dont les couches extérieures froides à -150°C atteignent 11 fois le diamètre de la Terre ; les planètes les plus éloignées, Saturne, Uranus, Neptune, Pluton gèlent aux environs de -200°C.

La disparité des situations possibles d'une planète à l'autre est si grande qu'on peut se demander combien faudrait-il en passer en revue dans l'ensemble du cosmos, si nous en avons la possibilité, pour trouver des conditions aussi favorables à la vie que celles dont nous bénéficions sur Terre! Malgré les milliards de milliards de planètes probables, notre situation n'est elle pas unique?

- Et revoilà l'anthropocentrisme, conclut Robin.

- Tiens! Une étoile filante, s'écria Grisella en tendant le bras, mais déjà elle avait disparu.

- Voilà justement encore de l'eau au moulin de l'anthropocentrisme, reprit le professeur; vous savez bien que les étoiles filantes sont des météorites qui brûlent en traversant l'atmosphère de la Terre, lorsqu'elles ne dépassent pas une certaine masse. Il en tombe, paraît-il, 300 tonnes par jour, même des très gros, mais notre atmosphère nous protège assez bien de ces bolides tant que leur dimension n'excède pas quelques dizaines de mètres ; le frottement brutal de l'air à 20 kilomètres par seconde leur donne un choc

thermique qui les fait éclater en une multitude de fragments plus petits qui brûlent avant de toucher le sol, ou, pour les fragments les moins combustibles, comme ceux contenant du fer, tombent sans faire trop de dégâts et font le bonheur des collectionneurs de pierres célestes. Toutefois si ces bolides dépassent 100.000 tonnes, cela devient plus grave, et le dernier bolide de ce genre est tombé en 1908 en Sibérie en détruisant la forêt sur 30 kilomètres de rayon.

Le plus gigantesque et le plus ancien de ces bolides est celui qui a sans doute frappé la Terre il y a 4,6 milliards d'années, dès sa naissance et bien avant l'apparition de la vie; ce "Grand Impacteur", comme l'appelle l'astrophysicien Trinh Xuan Thuan, représentant environ un dixième de la masse de la Terre, aurait arraché et satellisé un morceau de la Terre, qui serait devenu la lune.

Le bolide qui a le plus transformé la Terre après l'apparition de la vie est celui qui l'a frappée il y a 65 millions d'années et provoqué l'extinction des dinosaures ; celui-là n'avait que la taille d'une montagne, une quinzaine de kilomètres de diamètre, mais son impact dans le golfe du Mexique à 25 kilomètres par seconde équivalut à l'explosion de un milliard de bombes nucléaires du type Hiroshima, soulevant un nuage de poussières fines qui obscurcit le ciel de la Terre entière pendant des années, interrompant la photosynthèse, tuant la plupart des végétaux et des animaux. Seuls les petits mammifères souterrains qui survivaient péniblement sous les pieds des dinosaures en se nourrissant de stocks de graines survécurent en partie et purent assurer une descendance diversifiée, jusqu'au singe et à l'homme. On retrouve là encore cette idée irritante que le hasard apparent d'une collision puisse avoir été à l'origine de notre existence.

- Certes, contesta Noël, mais je crois que Einstein a dit ou écrit quelque part que le hasard est une façon pour Dieu de rester anonyme⁵⁸.

- Une telle collision peut aussi bien être notre perte, grinça Robin. Par Toutatis, les gaulois avaient tout de même raison de craindre que le ciel leur tombe sur la tête.

- Ce n'est pas impossible, le risque de percusion d'un astéroïde échappé de la ceinture d'astéroïdes circulant entre Mars et Jupiter n'est pas nul, on pense que des hécatombes du style dinosaures se sont produites à peu près tous les 40 millions d'années depuis la fin du permien. En janvier 1989, un bolide de 5 kilomètres de diamètre, que les astronomes ont naturellement nommé Toutatis, est passé à 15 millions de kilomètres de la Terre, soit seulement un dixième de la distance qui nous sépare du soleil.

Un autre risque est celui des comètes ; celle nommée Swift-Tuttle va passer très près de nous en août 2126 avec un noyau dur de 5 kilomètres.

En juillet 1994, les astronomes ont pu observer l'impact de la comète Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter qui a laissé des blessures de la taille de la Terre dans l'atmosphère gazeuse, ne se cicatrisant qu'en plusieurs années.

Ces bombardements par astéroïdes et comètes étaient beaucoup plus nombreux pendant le premier milliard d'années du système solaire ; c'est à cette époque que beaucoup de comètes, qui sont des grosses boules de neige porteuses de substances organiques, ont percuté la Terre, y apportant l'eau qui lui manquait, créant et peut-être ensemençant les océans avec les précurseurs de la vie que sont les acides aminés, dont on a trouvé plus de 400 types sur une météorite tombée en Australie en 1969.

Peut-on s'habituer à cette idée gênante pour notre cartésianisme, que des événements contingents, totalement imprévisibles comme l'impact de grosses météorites ou de comètes aient pu jouer et puissent jouer encore un rôle fondamental dans le devenir de l'homme?

⁵⁸ Rob Kaplan *Science Says* W.H.Freeman and Company New-York 2001

Comme l'écrit Trinh Xuan Thuan⁵⁹ : « Le Réel ne pourra jamais être décrit complètement par les seules lois de la physique. La contingence et l'histoire limiteront à tout jamais une explication complète de la réalité ».

- Grisella, je ne suis pas sûr que tu aies eu raison d'abandonner notre conversation philosophique et de nous attirer sur la terrasse, dit Noël, je crois que ce qu'on vient d'apercevoir dans le noir risque de te donner des cauchemars.
- Non, rassure toi, chaque fois que je vais voir un film d'horreur au cinéma, j'ai remarqué que je dors mieux après.
- Allez, tout le monde au lit, il nous reste à grimper l'Obiou demain, il ne faudra pas se lever trop tard, conclut Robin.
- Attend un peu Robin, le professeur semble avoir oublié de nous reparler de cette matière-ombre à laquelle il a fait allusion lors de notre première soirée, pourquoi?
- Parce que je ne vous ai parlé que des théories les plus généralement admises, et que celle-ci est encore au stade de l'exotisme. C'est Andreï Sakharov qui a émis le premier l'idée d'un double univers, idée reprise par les physiciens mathématiciens Abdus Salam, Michael Green et John Schwarz travaillant sur la théorie des supercordes, dont les cogitations firent émerger la nécessité d'un nouveau type de matière présente dans le même espace d'univers que celui où nous sommes, mais ne révélant sa présence qu'à travers la gravitation, toutes les autres interactions étant impossibles entre ces deux univers, en particulier l'interaction électromagnétique, ce qui rend cet univers jumeau invisible puisqu'il ne peut échanger des photons avec le nôtre.

Cet "univers ombre", que Jean-Pierre Petit⁶⁰ suggère d'appeler plutôt univers "fantôme", serait muni comme le nôtre de matière obéissant à la même loi d'attraction de Newton, mais entre cette matière ombre et notre matière, il y aurait répulsion selon une loi "anti-Newton", seule interaction entre ces deux univers. Si on suppose alors que l'univers global ait été dans ses débuts formé d'un mélange homogène de matière et de matière ombre, la répulsion gravitationnelle entre les deux les sépare, comme une émulsion de deux liquides non miscibles, et là où il se forme des concentrations de matière comme dans les galaxies, la matière ombre s'écarte et confine ces galaxies dans une sorte de bulle qui les enferme et les stabilise en contrariant leur propre force centrifuge, expliquant ainsi leur comportement sans faire appel à la matière "sombre" dont on peine à prouver l'existence. Cette théorie explique aussi la structure à grande échelle de l'univers, où l'on constate que les amas de galaxies se groupent sur les parois de sortes de bulles vides jointives, comme sur les parois des bulles d'une mousse de savon, donnant à notre univers une structure lacunaire. La matière ombre occuperait l'intérieur de ces bulles et confinerait par répulsion la matière de notre univers sur ces parois, expliquant là encore cette structure lacunaire.

Ces idées déconcertantes induisent d'autres développements tout aussi déconcertants: la théorie des groupes, qui est à la base de ce travail, impose une flèche du temps inverse dans l'univers fantôme, qui serait donc un univers néguentropique, alors que dans le nôtre, l'entropie ne cesse d'augmenter. Mais arrêtons nous là pour ce soir, car nous frôlons la science fiction. Cette fois-ci je vous propose de passer à l'horizontale et vous souhaite une bonne nuit à tous.

- Après cette journée éprouvante, je sens que je vais passer très vite dans l'univers ombre, conclut Robin dans un énorme bâillement.

⁵⁹ Trinh Xuan Thuan *Le chaos et l'harmonie* p95 Fayard 1998

⁶⁰ Jean-Pierre Petit *On a perdu la moitié de l'univers* Hachette Pluriel 2001

9

Candide trouvait mademoiselle Cunégonde extrêmement belle, quoiqu'il ne prît jamais la hardiesse de le lui dire.

Après leur première nuit vraiment confortable depuis leur départ, Noël fut le premier levé ; il ouvrit la porte du refuge et s'étira en contemplant le paysage que l'orage de la veille ne leur avait pas permis d'apercevoir.

Depuis l'éperon sur lequel était bâti le refuge, on devinait en bas la vallée encore dans l'ombre sous une chape de brouillard, alors qu'à l'altitude du refuge, le soleil avait déjà nettoyé le ciel où seule une très légère brume tamisait la lumière bleutée de ce matin calme ; les sommets environnants étaient déjà éclairés d'une vive lumière, et sur les plus de 3.000, le voile de la première neige fraîche tombée pendant l'orage scintillait sur les crêtes.

Ecartant les herbes mouillées, il se fraya un chemin dans cette fraîcheur. En quelques foulées dans la rosée, il descendit vers l'orée de la forêt où il savait retrouver une source jaillissant sous la roche, alimentant une vasque d'eau claire où il se plongeait le visage, s'ébrouant et se frictionnant, totalement réveillé cette fois.

En remontant la pente, il entendit les voix du reste de la troupe qu'il aperçut bientôt sur le seuil du refuge, préparant le petit déjeuner au grand soleil.

- Arrive, Noël, ton café t'attend, lui cria gaiement Grisella dès qu'il fut en vue. Tout le monde a bien dormi et ce matin la vie est belle.

Ils semblaient effectivement tous de belle humeur et prêts à attaquer joyeusement la journée ; le professeur Kirgard avait oublié sa déprime de la veille. Ils déjeunèrent en bavardant, tantôt déambulant sur la terrasse, tantôt assis sur la rambarde qui la bordait.

- Venez voir cette perfection ! s'exclama Robin en leur indiquant de la main une grande toile d'araignée étoilée entre les barreaux de la rambarde, scintillante de perles de rosée sous les rayons rasants du soleil, parfaite dans sa construction, avec l'espacement rigoureux de ses mailles et la précision angulaire de ses tendeurs radiaux, l'araignée architecte veillait au centre, recroquevillée, semblant dormir après son travail de la nuit.

Du vrai travail d'ingénieur ! continua Robin. Qui osera dire que les araignées ne sont pas intelligentes ? Et de plus, c'est beau.

- Je ne suis pas surprise que tu apprécies l'intelligence du piège, releva Grisella, mais je le suis que tu le trouves beau ! C'est plutôt Noël qui jusqu'alors nous avait accoutumés à souligner les beautés de la nature, que chaque fois tu accueillais avec quelque sarcasme.

Tu provoques l'occasion de faire ce plaisir à Noël de parler enfin de cette beauté qui lui tient tant à cœur et qui semblait échapper à certains, au moins jusqu'à ce matin, Robin ?

cela pourrait nous reposer ce matin de la physique fondamentale, de la philosophie et de l'astrophysique que nous manipulons dans notre "enquête-party" ; qu'en pensez-vous tous ?

- Et tu trouves que ce n'est pas aussi de la philosophie ? grogna Robin ; tu sais bien qu'on ne pourra en dire que des choses aussi peu convaincantes qu'en matière de religion, et aussi beaucoup de fadaïses, mais après tout, c'est tout de même moins irritant. Si tu y tiens vraiment, je proposerais alors de laisser d'abord Noël commencer par nous expliquer ce qu'il entend par beauté, car la crapaud est sans doute belle pour le crapaud, et je doute qu'il puisse nous donner une définition convenable de cette beauté.

- On croirait que tu ne te souviens plus de ce qu'est un axiome en mathématiques, rétorqua Noël, c'est une déclaration que tout le monde admet comme véridique bien que personne ne puisse la démontrer, eh bien ! la beauté me semble également de nature axiomatique, je ne pense pas qu'on puisse en donner une définition analytique comme tu le souhaiterais, mais tout le monde s'accorde en général à émettre le même jugement de beauté sur les mêmes choses, à condition bien sûr de rester dans le genre humain et de ne pas essayer de faire dire à un crapaud ce qu'il trouve beau. D'ailleurs, sur cette nature axiomatique de la beauté, je te renvoie à nouveau au Tao Te King que le professeur citait hier :

« Tous dans le monde reconnaissent le beau comme beau ; ainsi est admis le laid ⁶¹ »

- Mais puisque tu te déguises en bon occidental analytique, je veux bien jouer avec toi sur ce terrain, et malgré la réserve de la sentence Zen qui dit qu'à l'instant où l'on parle d'une chose, on la manque, je vais essayer de te suivre dans ton besoin de définition en cherchant quelques mots-clés qui puissent te mettre sur la piste de cette énigme qu'est la beauté. Voyons, je pourrais commencer par "remarquable", "admirable", "satisfaisant", j'évite le mot "esthétique" parce qu'il va me renvoyer en circuit fermé à une définition de dictionnaire où la beauté est ce qui est conforme à un idéal esthétique.

- Zéro ! mon vieux. Remarquable par quoi ? admirable par quoi ? satisfaisant par quoi ?

- Tu me prends de court, laisse moi réfléchir un peu. Je pourrais ajouter "régularité", oui, "remarquable" et "admirable" par une "régularité", un "ordre", comme cette toile d'araignée peut-être ?, ou comme la spirale mathématique des ammonites d'hier matin ?.

- 3 sur 20, c'est très faible ! Ta définition est plutôt celle de la science, qui ne fait que formuler mathématiquement les régularités observables de la nature, qui n'inspirent pas forcément un sentiment esthétique. Rajoute des mots-clés.

- Je conteste, mon vieux, les grandes lois scientifiques sont pleines de beauté lorsqu'elles expriment un contenu fondamental dans une formulation dense d'une élégante simplicité ; exemple $E = m.c^2$, tu ne trouves pas ça admirable d'élégance, ou bien encore $d^2 = (c.t)^2 - l^2$, il y a un contenu fou en si peu de termes, je trouve ça splendide, la beauté réside dans le choix des concepts efficaces permettant une expression simple de lois générales ; mais laissons là l'esthétique mathématique et cherchons des mots-clés plus évocateurs. Les "sens", ça devrait te plaire ? car ce ne sont pas des "régularités" à manipuler intellectuellement pour en faire des lois de la physique, mais des régularités perceptibles par les sens, la vue, l'ouïe.

- 7 sur 20, tu progresses ! Mais pourquoi des dispositions régulières seraient-elles séduisantes ?

⁶¹ Lao Tseu, *Tao Te King*, p2 Librairie d'Amérique et d'Orient traduction Duyvendak 1981

- Tu aurais peut-être dû le demander à Aristote, qui trouvait beau le cercle car il présente la régularité de forme la plus parfaite, avec le plus grand nombre de symétries, ainsi qu'à ses successeurs qui voyaient la perfection divine du monde dans les orbites circulaires des planètes. C'est tout de même une assez vieille idée partagée que la symétrie apporte de la beauté! Regarde les pyramides d'Egypte, l'Acropole d'Athènes, les arcs de triomphe romains, le Taj Mahal, et quand Louis XIV a construit Versailles et ses jardins, il me semble qu'il en a aussi tenu compte, non ? On retombe ici sur le caractère axiomatique de la beauté.
- Tu constates une coutume dans les goûts, mais tu n'expliques rien! Et d'autre part, pense à la cathédrale de Chartres qui présente deux tours dissymétriques, ne la trouves-tu pas également belle?
- Ce n'est qu'une légère dissymétrie de dessin dans une symétrie d'architecture, qui ne fait que souligner en l'enrichissant la belle symétrie d'ensemble ; une petite dose de rupture de symétrie exalte la beauté, comme un attrait vers la différence ; cela m'incite à ajouter un nouveau mot clé qui pourrait être "différent", et aussi "inattendu", comme un grain de "beauté" sur une joue qui peut aviver la beauté d'un visage symétrique.
- "Différent" ! je sens que tu vas en venir au sexe, ce qui expliquerait la beauté de la crapaud pour le crapaud, mais tu changes de registre et tu n'as toujours pas donné d'indication sur ta connexion première entre symétrie et beauté.
- Cherchons encore ! J'ajouterais aussi "rare" comme mot-clé, car la symétrie est plutôt rare et "inattendue", "différente", dans un monde dont l'évolution est accompagnée par l'augmentation d'entropie, donc condamnée à un désordre croissant. Lorsqu'on trouve cette symétrie dans la nature, comme dans les fleurs ou les cristaux de neige, on est frappé par cette disposition rare, et on la trouve spontanément belle. Toute mise en ordre d'éléments de la nature est rare, et étant rare, elle est chère à nos cœurs, c'est peut-être pour cela qu'elle est jugée belle ?

Assistant tous deux silencieusement amusés à cette maïeutique de Robin sur Noël, Grisella jeta un regard inquiet au professeur et lui glissa à voix basse : le pauvre Noël va sûrement finir par se planter, il va tomber dans des sophismes du genre : ce qui est rare est cher, ce qui est bon marché est rare, donc ce qui est cher est bon marché.

- Tu n'as qu'à comparer la musique et un bruit de fond, reprit courageusement Noël, les bruits de fond, on en trouve hélas partout, ils ne sont pas rares car ils accompagnent l'évolution de beaucoup de phénomènes physiques, c'est un peu comme d'entendre l'augmentation d'entropie, c'est commun, habituel, et n'a pas de valeur positive, alors que la musique qui est une mise en ordre de sons selon certaines règles qu'on peut appeler de "symétrie" au sens large, au moins pour la musique classique, produit des phrases musicales qu'on ne trouve pas naturellement en écoutant la nature, elles sont "rares" et donnent un sentiment d'harmonie liée à leur règles de mise en ordre, qui est de la beauté musicale.
- Noël s'en est mieux tiré que je ne le craignais ! intervint Grisella, tu devrais monter sa note à 9 sur 20 à ce stade, Robin.
- Ouais, je veux bien ! Il progresse un peu, parce que c'est plus facile avec l'oreille qu'avec l'œil, et je ne vais pas le taquiner davantage sur certaines œuvres musicales modernes excluant toute règle, car il pourrait toujours me répondre qu'il n'y trouve aucune beauté, ce qui me clouerait le bec ; mais je voudrais le ramener dans le domaine de la beauté visuelle où les choses me paraissent beaucoup plus discutables. Pourquoi les canons de la beauté ont-ils tellement changé en peinture, le "classicisme" académique que l'on trouvait parfait

jusqu'au milieu du dix neuvième siècle a été dévalorisé et "académisme" s'est un peu apparenté à "pompier" ?

- Je pense que là aussi la rareté a pu jouer son rôle ; un portrait ressemblant et bien rendu était difficile à réaliser et demandait la main d'un maître, il était "rare" et donc apprécié. L'apparition de la photographie, qui rendait possible l'obtention de portraits très ressemblants rapidement et à peu de frais, a fait disparaître la rareté, et même si la qualité des supports était moins bonne et si la couleur s'est faite un peu attendre, les canons de la beauté en peinture se sont reportés ailleurs, sur l'expression plus directe des impressions que ressent l'artiste avec les écoles impressionnistes, les Nabis, le pointillisme, sur la suggestion onirique et poétique avec le surréalisme, sur les couleurs et sur le dépouillement des formes avec le fauvisme, puis le cubisme, et tout ce qu'on appelle maintenant globalement l'art abstrait.

La peinture a été intellectualisée, débarrassée d'un souci exagéré de copie de la nature, pour s'orienter vers une transmission plus directe d'une émotion à travers des formes et des couleurs plus libres. Tiens ! sur les couleurs, justement, je crois qu'on peut faire un parallèle avec le bruit de fond et la musique ; si on mélange trop de couleurs, on obtient un teinte terreuse comparable au bruit de fond résultant du mélange des sons, alors qu'une juxtaposition de teintes bien choisies peut donner un sentiment d'harmonie et de beauté, comme le donne une phrase musicale. Dans cette mise en ordre, je vois là encore une espèce de lutte contre l'entropie qui tire vers l'uniformité.

- Curieux, ton analogie entre l'art et la néguentropie! mais après tout, c'est présentable et j'ai envie de monter ta note à 11. Il me semble toutefois que tu as laissé tomber en route le mot-clé "différence", qui avait fait "tilt" dans mon esprit car j'ai cru que tu allais enchaîner sur les liens entre beauté et sexualité, qui me paraissent évidents. Etant homme, je suis effectivement d'accord avec Lao Tseu pour reconnaître la beauté d'une jolie fille spontanément et sans discours.

- Je ne peux que te donner accord sur l'évidence de ce lien entre beauté et sexualité, Robin, mais il me semble qu'il ne se réduit pas à l'attrait de la "petite différence" dans une grande "symétrie" d'ensemble, comme la cathédrale de Chartres. Je ne vois pas d'autre mot-clé pour te guider dans ce lien entre beauté et sexualité qui reste un grand mystère. Pourquoi avoir nimbé la reproduction sexuée de beauté et d'amour ? Voilà une question qui me semble aussi difficile à explorer que tous les concepts physiques que nous venons d'aborder, et je ne pense pas que le professeur Kirgard puisse nous être d'une grande aide dans ce domaine plutôt philosophique !

- En effet, admit Kirgard, mon charisme personnel m'a toujours orienté vers l'analyse des structures considérées comme "simples" de la physique dans lesquelles j'ai déjà trouvé suffisamment de brouillard en décortiquant des phénomènes que l'on ne comprend pas vraiment, pour ne pas oser m'aventurer dans les structures désespérément complexes de la vie ; j'ai plutôt l'esprit découpeur d'un Démocrite que le tempérament d'explorateur d'un Livingstone et je renâcle à errer dans la forêt vierge d'un continent obscur d'exubérance vitale. Quand je pense que les polymères industriels de nos matières plastiques sont faits de macromolécules contenant déjà des centaines d'atomes, je suis un peu effaré qu'une seule molécule d'une protéine de la vie contienne plus de 500 acides aminés dont chacun comporte plusieurs dizaines d'atomes, qu'une cellule humaine synthétise 10.000 à 20.000 protéines différentes et que le corps humain contienne 100.000 milliards de cellules différenciées.

Je crains que la question que se pose Noël ne reste toujours du domaine de la philosophie, et encore ! La limite actuelle de l'analyse en biologie me semble être la recherche sur le génome, dont le succès est encore loin d'être complet. Maintenant que l'on sait que l'individualité d'un homme est définie par l'ordre des quatre types de barreaux de cette échelle double spiralee qu'est la molécule d'ADN, qui contient le plan de construction de toutes les cellules de l'organisme à travers les gènes et les chromosomes, qu'on peut considérer pour simplifier comme des groupements de barreaux, il reste à regarder de près

ces barreaux, et il y en a 3,5 milliards. C'est nettement plus difficile que de lister ceux des bactéries dont nous descendons et qui n'en ont que 1,5 million. A l'arrivée de ce parcours, on sait reconnaître l'empreinte génétique d'un homme, ce qui aide la police, on parviendra peut-être à guérir quelques maladies génétiques, mais cela m'étonnerait beaucoup que l'on puisse avancer d'un pas vers la réponse à la question de Noël et qu'on découvre dans les gènes un indice d'une relation quelconque entre la sexualité et ces concepts de beauté et d'amour dont j'imagine mal à quelle caractéristique physique ou chimique ils pourraient correspondre sous un microscope.

- C'est dommage que ce soit un domaine où l'on reste si aveugle sur cette relation beauté-sexualité, dit Grisella, car elle est tellement évidente. C'est dans les fleurs que sont les organes sexuels des plantes, pas dans la tige ni dans les racines, et la période de floraison qui est celle de la reproduction est dans le même temps la période de beauté, les deux coïncident dans la vie des végétaux et on a l'impression que cette beauté est nécessaire à cette reproduction, puis c'est la mort de la fleur et la naissance du fruit, dont les graines perpétueront l'espèce ; « et rose, elle a vécu ce que vivent les roses, l'espace d'un matin » ; et la même chose peut être dite des animaux et des hommes.

- Il y a sûrement là une ruse de la vie qui utilise tous les moyens imaginables et inimaginables pour se perpétuer sans se soucier de la compréhensibilité de ces moyens par l'homme, commenta Kirgard. Quand un être vivant meurt, qu'est-ce qui lui survit matériellement, sinon les gènes qu'il a transmis à sa descendance.

C'est la règle depuis plus de trois milliards d'années que la vie existe sur Terre, c'était totalement vrai pour les premiers organismes qui ont occupé le terrain pendant les deux premiers milliards d'années, les bactéries ancêtres des animaux et les algues bleues ancêtres des végétaux, dont la reproduction se faisait à l'identique par division cellulaire ; c'est un peu moins vrai depuis un milliard d'années que la nature a inventé la reproduction sexuée où l'échelle de l'ADN perd un des montants du père et un des montants de la mère, et où l'échelle reconstituée dans l'embryon de l'enfant mélange les deux plans de construction du père et de la mère pour en faire un plan nouveau, unique sauf cas de jumeaux, contenant par moitié les gènes du père et de la mère, dans un ordre qui peut être d'une infinie diversité puisque chez l'homme, il y a 2^{23} manières différentes de recréer un jeu de 23 chromosomes avec les 23 paires de chaque sexe, ce qui explique que les frères ou les sœurs ne se ressemblent jamais totalement.

L'avantage de cette reproduction sexuée est cette diversité et cette unicité de chacun des êtres supérieurs dont nous sommes, mais ce que certains peuvent considérer comme un inconvénient est la dilution progressive du patrimoine génétique dans celui des descendants, la contribution des parents étant divisée par deux d'une génération à l'autre, ce qui fait qu'il est plus difficile de percevoir une ressemblance des enfants avec les grands parents qu'avec les parents, mais parmi les quelques 100.000 gènes de l'homme, il en subsiste tout de même beaucoup à travers les générations successives.

Le gène est donc ce qui subsiste d'un organisme vivant après sa mort, ce qui laisse soupçonner cette ruse de la nature à laquelle je faisais allusion, ruse dont le but serait la survivance du gène, qui use de tous les moyens pour assurer sa perpétuation. On pense que dans les premiers temps de la vie, les gènes se nourrissaient de molécules organiques, puis, cette nourriture devenant insuffisante, ils sont entrés dans des cellules d'organismes de plus en plus complexes qui ne leur servent que de véhicule pour continuer à se reproduire, et depuis cette époque ils sont immortels et sautent de corps en corps pour survivre⁶²⁶³. C'est ce que Dawkins appelle l'égoïsme du gène⁶⁴.

⁶² Pierre Naslin *Du big bang à l'homme* p24 SIRPE 1995

⁶³ E.O.Wilson *Sociobiology* Harvard University Press 1975

⁶⁴ R. Dawkins *Le gène égoïste* Mengès

- C'est une idée qui éclaire bien pourquoi les chattes miaulent de désir en fin d'hiver pour attirer les matous qui vont permettre aux gènes de se perpétuer, bien que je n'aie jamais réalisé avant ce matin que c'est l'égoïsme du gène qui faisait miauler les chattes en février pour assurer les meilleures conditions printanières à la portée de chatons chargée d'assurer l'avenir du gène ! ils sont remarquablement intelligents, ces gènes !

Mais reconnaissez que c'est une idée assez déplaisante, qui enlève beaucoup de poésie à l'amour dès que vous l'appliquez à l'homme, gémit Grisella, pourquoi tant de littérature sur l'amour !

- C'est peut-être encore une ruse de la nature, railla Robin, qui enjolive la volonté du gène d'agréables fantasmes, sinon l'homme ressentirait le désir comme une contrainte, une limitation de sa liberté et de sa volonté effacées par celles du gène.

- Cela m'a l'air d'un éclairage plutôt volontariste, une interprétation parmi d'autres, objecta Noël, on aurait pu aussi bien parler de l'égoïsme des protons et électrons qui sont eux aussi éternels et passent depuis que le monde est monde d'une matière à une autre ou à un être vivant, toutes les structures étant mortelles, seuls les protons et électrons ne l'étant pas. Je ne peux pas me satisfaire d'une telle explication. C'est comme dire que l'entropie commande la marche du monde, alors qu'elle l'accompagne, je n'aime pas l'idée que l'égoïsme du gène commande l'évolution de la vie.

Pourquoi pour réussir à survivre s'être entouré de machines de survie de plus en plus complexes, de la membrane de protection initiale jusqu'à l'homme, qui ne serait donc pour les gènes qu'un véhicule comme bien d'autres, pourquoi ne pas avoir trouvé un mécanisme plus simple, à portée d'analyse d'un positiviste lambda, et pourquoi s'entourer de tant de mystère et faire entrer en scène des phénomènes tellement complexes que les hommes ont inventé les concepts de beauté, d'amour et de désir pour les repérer, en désespoir de compréhension, comme ces médecins de Molière donnaient un nom à ce qu'ils ne comprenaient pas.

J'ai du mal à admettre que la beauté des fleurs, la variété de leurs couleurs et de leurs formes n'ont été inventées que comme des panneaux indicateurs bien voyants pour les abeilles qui viendront les polléniser afin d'assurer la survie des gènes de la plante. Pourquoi aussi ces merveilleux papillons aux couleurs chatoyantes ? pour servir de panneaux indicateurs aux papillons de l'autre sexe, mais également aux oiseaux pour se faire dévorer plus facilement et assurer ainsi la survie des gènes des oiseaux par une nourriture suffisante assurant leur bonne reproduction ? Tout cela me paraît à la fois compliqué et simpliste ! Je préfère renoncer à toute enquête sur ce terrain et reconnaître notre ignorance sur la vraie nature des forces qui nous guident :

Tous : roi débile, fou diagonal, reine
Acharnée, tour directe et pions rusés,
Par le noir et le blanc de leur trajet
Cherchent et livrent leur bataille concertée.
Ils ne savent pas l'évidente main
Du joueur qui dirige leur destin ;
L'inflexible et transparente rigueur
Qui pour eux choisit et mesure le chemin.
Le joueur, à son tour, se trouve prisonnier
(Omar l'a dit) des cases d'un autre échiquier
Où les nuits sont les noires et les jours les blanches
Dieu meut le joueur et le joueur, la pièce
Quel dieu, derrière Dieu, commence cette trame
De poussière et de temps, de rêves et de larmes ?⁶⁵

⁶⁵ Jorge Luis Borges *Antologia personal*, traduction Roger Caillois

Comment comprendre vraiment quelque chose à ce phénomène extravagant qu'est la vie si multiforme, qui sort de partout, de l'espace interstellaire, de l'atmosphère originelle, de l'océan primitif et de ses sources hydrothermales, des argiles de la croûte terrestre, qui repart après les catastrophes, qui s'adapte, se camoufle, est belle, cruelle, partenaire de la mort dont elle se nourrit ? Pourquoi ne pas reconnaître notre impuissance devant la complexité de la vie ? Et pourquoi attendre de la biologie ce que le professeur Kirgard gémissait hier de ne pas avoir obtenu de la physique

- Arrête un peu ton discours à cheval sur la vie, la beauté et la sexualité, Noël, reprit Robin, on est tombé sur un point dur, contourne le. Et la beauté des couchers de soleil, et la beauté de cette montagne, ce ne sont pas des beautés très sexy ni très symétriques, as-tu un mot-clé intégrateur qui permette de loger tout cela dans un même sac ?

- Alors je crois que je pourrais ajouter "émotion", l'émotion des sens, c'est commun à l'amour, au désir, à la sexualité, à la vue d'un coucher de soleil ou de cette montagne rafraîchissante. C'est aussi ce qui différencie le véritable art de l'art décoratif, qui est plaisant, agréable, qui crée une ambiance, mais ne provoque pas l'émotion à laquelle se sont notamment attachées les écoles de peinture françaises de la fin du dix-neuvième siècle. Un Monet te donne une émotion directe parce que ce n'est justement pas la vue photographique des choses, mais une vue émotionnelle filtrée par l'impression du moment fugitif, un Van Gogh te communique son angoisse existentielle à travers sa facture aux touches torturées, un Chagall te plonge dans une mystique slave mi-tourmentée, mi-enfantine ; de même un canon de Pachelbel ou une fugue de Bach t'emplissent d'un sentiment de plénitude mesurée et de recueillement religieux, un concerto de Mozart te fait pénétrer dans un monde de beauté subtile et raffinée, une musique de Sati ralentit ton cœur et t'imprègne d'une calme mélancolie, tous te communiquent une émotion. Cette émotion est comme un accès direct à quelque chose de fondamental, à la chose "en soi". Comme dit Lao tseu, l'art, comme le mysticisme, sont des tentatives pour accéder directement aux racines du Tao, alors que la science s'emploie à en décrire et comprendre les branches.

- Bon, tu ne t'es pas trop mal débrouillé dans l'ensemble et je te mets un 14 sur 20, c'est considéré comme une bonne note pour une épreuve de philo. Et maintenant il serait peut-être temps de lever le camp pour profiter du beau temps revenu.

- Tu vois, Robin, c'est toi qui vient de dire "beau" devant "temps", c'est quoi, ce beau là ?

- Là, c'est un "beau" tout simple, qui rentre dans un de tes premiers mots-clés : "satisfaisant", ça veut dire que le ciel ne va pas nous tomber sur la tête comme hier. Allez, en route !

10

L'entropie, je suis

plutôt contre

Pour leur dernière journée de randonnée, ils avaient prévu de grimper à l'Obiou par son flanc nord, longue marche à partir d'un col proche du refuge, par un chemin en zig-zag dans les prairies, aboutissant à un second col ouvrant sur la vaste face nord entièrement rocheuse, encore dans l'ombre lorsqu'ils y parvinrent, où l'on pouvait à peine deviner la suite du chemin dans la pierraille. On n'apercevait plus aucune trace de végétation au delà des vastes pierriers qui dévalaient jusqu'à leurs pieds

Après deux heures de marche d'approche, ils décidèrent une pause avant de pénétrer dans ce monde minéral et s'allongèrent sur les derniers coins d'herbe, savourant cette détente avant la forte grimpe, en grignotant quelques abricots secs dans le silence seulement entrecoupé des échos des cris des choucas répercutés par la haute paroi qui les dominait.

C'est Robin qui coupa le premier ce silence masticateur:

- Votre silence me donne à penser que nous avons enfin tari nos sources de brain storming et sommes fatigués de cette enquête, on va pouvoir enfin grimper la tête vide.
- Pas tout à fait, réagit Grisella, moi j'aurais une demande personnelle à faire au professeur Kirgard, mais qui n'intéresse peut-être pas les garçons.

- Si tu penses que c'est dans mes cordes, Grisella, dis toujours.

- Ça l'est sûrement ; vous nous avez décortiqué la matière au niveau de la physique relativiste, quantique et nucléaire, et cela m'a personnellement bien mis les idées en place, mais il y a une notion de simple physique classique que je n'ai jamais bien assimilée faute d'avoir poussé mes études dans cette voie, c'est cette entropie dont on dit beaucoup de choses, qu'elle tire le monde vers l'uniformité, qu'elle est liée à la notion de temps, qu'elle l'est aussi à la probabilité, au désordre et à l'information, dont Noël s'est même servi ce matin dans son plaidoyer sur la beauté, et qui diminuerait dans l'univers "ombre" alors qu'elle augmente dans notre propre univers. A travers tous les qualificatifs que vous lui avez attribués, j'ai le sentiment que si cette entropie n'est pas un "coupable" possible de la création du monde, elle semble par contre être un suspect tout désigné de sa destruction. Pour moi, cela reste une notion trouble, dont je ne vois pas clairement ce qu'elle recouvre. J'aimerais que vous puissiez m'éclaircir les idées, si cela n'ennuie pas mes amis masculins, car je suppose que faisant des études d'ingénieur, ils jonglent avec ce concept.

- Bien sûr qu'ils jonglent avec, et ils peuvent donc fort bien te l'expliquer à ma place. Qu'en penses-tu, Robin ?.

- Hou la la ! moi qui espérait garder la tête vide pour grimper! Je me sens victimisé!
Il y a certes plusieurs manières d'aborder ce concept un peu obscur, qui ne sont ni l'une ni l'autre très faciles à expliquer si on veut éviter de remplir un tableau avec des intégrales, des probabilités et des logarithmes, bien que je sache que cela ne risque pas de t'effrayer, Grisella. Je crois que je devrais commencer par te consoler en te disant que c'est une grandeur physique qui était passée totalement inaperçue jusqu'au XIX^{ème} siècle dernier où on a commencé à extraire la force motrice de la chaleur avec les machines à vapeur. Newton avait établi 200 ans plus tôt les lois essentielles de la mécanique, mais il n'avait étudié *que* cette mécanique, et non pas son interférence avec la chaleur, que 200 ans après lui, Clausius allait défricher pour permettre le développement des machines à vapeur et autres locomotives.

Disons que Clausius a défini une seconde image de l'état d'un système isolé (les physiciens appellent ces images des fonctions d'état) :

- La première image, déjà bien connue à l'époque, était l'*énergie* d'un système isolé, dont la loi fondamentale est qu'elle reste constante dans le temps ; c'est la loi bien connue de conservation de l'énergie. Si on divise ce système isolé en deux parties interagissant, l'énergie gagnée par l'une sera égale à l'énergie perdue par l'autre, mais la somme restera constante.
- La seconde image ajoutée par Clausius est l'*entropie*, dont la loi fondamentale est que, contrairement à l'énergie, l'entropie d'un système isolé réel ne reste jamais constante, mais augmente avec le temps. Si on divise ce système en deux parties interagissant, l'entropie gagnée par l'une sera toujours supérieure à l'entropie perdue par l'autre, et l'entropie totale, somme des deux, ne pourra qu'augmenter.

Pour cerner l'idée d'entropie, je trouve plus facile de parler d'abord de la variation d'entropie d'un système à température T , qui passe d'un état donné à un autre état très voisin en recevant une petite quantité de chaleur dQ ; sa variation d'entropie est, par définition Clausius, dQ/T . La température absolue T étant par nature toujours positive, un corps qui reçoit de la chaleur augmente son entropie, s'il perd de la chaleur, son entropie diminue.

Si maintenant on cherche quelle est la variation d'entropie en passant d'un état donné à un autre état assez éloigné, il suffit de découper le trajet en petits intervalles et de cumuler les variations d'entropie observées dans chaque intervalle ; à toi qui fais des maths, je n'ai pas besoin de t'expliquer que ça s'appelle faire une intégrale.

A partir de cette définition, il est facile de comprendre sur un exemple simple pourquoi l'entropie d'un système isolé ne peut qu'augmenter : prenons comme système une boîte thermiquement isolée de l'extérieur, divisée en deux compartiments égaux, eux-mêmes isolés l'un de l'autre et contenant la même quantité du même corps, gazeux, ou liquide, ou solide, peu importe, mais à des températures différentes entre un compartiment et l'autre, par exemple $200K$ à gauche et $600K$ à droite. Si j'enlève la cloison isolant les deux compartiments, tu devines qu'après un certain temps leurs températures vont s'égaliser à une valeur moyenne de $400K$ qui sera un état d'équilibre puisque la température sera uniforme dans la boîte.

Dans cet état final, le compartiment le plus froid aura reçu une quantité de chaleur Q et sa température aura augmenté de $200K$ jusqu'à atteindre $400K$, mais en restant constamment inférieure à 400 , avec une valeur moyenne de $300K$ au cours de son évolution ; son entropie aura donc augmenté de $Q/300$. Par contre le compartiment le plus chaud aura cédé la même quantité de chaleur Q , transférée de la partie chaude vers la partie froide, respectant ainsi le principe de conservation de l'énergie, et sa température aura baissé de $600K$ jusqu'à atteindre également $400K$ qui sera l'état d'équilibre thermique permanent, mais en restant toujours supérieure à 400 au cours de cette baisse, avec une valeur moyenne de $500K$; son entropie aura donc diminué de $Q/500$, donc moins que n'a augmenté celle de la partie froide. L'entropie globale de la boîte isolée, somme des deux, a donc bien augmenté de $Q/300 - Q/500$, en même temps que les températures initialement différentes se sont uniformisées. Tu entends maintenant pourquoi on peut dire que l'augmentation d'entropie tire vers l'uniformité ?

- OK, Robin, remercia Grisella, voilà un exemple fort simple, peut-être trop simple, car il ne fait que présenter sous une autre forme le fait d'évidence qu'un flux de chaleur va toujours du chaud vers le froid ; j'imagine qu'il y a des implications plus complexes dès qu'on sort du domaine de la simple thermique, et ton exemple ne me laisse pas entrevoir pourquoi le professeur Kirgard nous a dit que l'entropie est indissolublement liée à la flèche du temps ? Pourquoi existe-t-il une telle grandeur qui croît avec le temps qui passe, alors que d'autres comme l'énergie restent constantes ?

- Pour essayer d'y voir un peu plus clair, je te propose de réfléchir un instant sur cette première loi de la conservation de l'énergie. Tu constates que celle-ci ne fait pas intervenir le sens du temps puisque l'énergie a la même valeur avant et après n'importe quel événement survenant dans un système isolé ; sa forme peut varier, mécanique, potentielle, ou cinétique, travail, chaleur, consommation d'électricité, mais elle est indifférente à l'écoulement du temps. On retrouve à tout moment la même quantité d'énergie que celle ayant pu y être observée dans le passé. On ne la retrouve pas forcément sous la même forme, de l'énergie thermique ou électrique a pu se transformer en travail mécanique dans un moteur, ce travail a pu se transformer partiellement ou totalement en chaleur, mais on retrouve la même quantité d'énergie globale.

Pour la mathématicienne que tu es, cela signifie que si on change t en $-t$ dans les équations reliant la variation de l'énergie à la variation du temps, le résultat ne change pas, ce qui exige que le temps t n'intervienne dans ces équations qu'avec un exposant pair ou une dérivation paire, comme un carré ou une dérivée d'ordre deux. On est alors dans un monde réversible, où le temps ne joue pas de rôle vis à vis de l'énergie.

L'exemple le plus simple que l'on puisse en donner est celui d'un pendule sans frottement dont l'équation différentielle en d^2x/dt^2 est bien connue des potaches. La double dérivation change deux fois le signe du temps t et rend donc l'équation insensible à ce signe. Dans ce système isolé idéal, l'énergie se conserve et le mouvement oscillatoire du pendule idéal est perpétuel, l'énergie potentielle et l'énergie cinétique se transformant alternativement l'une dans l'autre de manière réversible. Si tu filmes le mouvement du pendule et que tu présentes ce film à l'endroit puis à l'envers, personne ne pourra percevoir de différence entre les deux sens d'écoulement du temps. Tu es dans un monde réversible et tu constates donc que le principe de la conservation de l'énergie n'attribue pas de sens au temps.

Tu noteras en passant que jusqu'au dix-neuvième siècle, la science majeure était l'astronomie, pour laquelle les lois de la mécanique céleste établies par Newton présentaient en première approximation ce caractère de réversibilité, qui a permis la rétro-diction aussi bien que la prédiction des événements astronomiques comme les éclipses ou les comètes avec une précision déjà très bonne.

Venons en à la deuxième loi de la thermodynamique, qui dit que l'entropie augmente avec le temps. Cela signifie que dans un système isolé réel, on ne pourra jamais retrouver dans le futur l'état d'entropie qu'il a connu dans le passé. L'évolution est irréversible, et l'entropie est en quelque sorte une mesure de ce degré d'irréversibilité.

On est tellement habitué à vivre au milieu des évolutions irréversibles qu'on ne se pose même plus la question de savoir pourquoi cela se passe comme cela et pas autrement : pourquoi la chaleur s'écoule spontanément d'un corps chaud vers un corps froid et pas l'inverse ? Pourquoi le sucre se dissout dans ta tasse de café, alors que tu n'as jamais vu un morceau de sucre se former spontanément dans ta tasse de café sucré ? Tu assembles un puzzle et tu le déposes soigneusement dans sa boîte, puis tu secoues la boîte pendant quelques secondes et tu es certaine en l'ouvrant de le retrouver en pièces désordonnées ; pourquoi en secouant la boîte pendant un milliard d'années n'as-tu aucune chance de le voir spontanément reconstitué ? Pourquoi tous les êtres vivants vieillissent et vont de la naissance à la mort sans jamais rajeunir et faire le trajet inverse ?

Cette irréversibilité nous aveugle tellement par son évidence que ce n'est qu'au dix-neuvième siècle que ces petits problèmes, qui ne paraissent pas en être pour l'homme de la rue, ont commencé à faire l'objet d'une préoccupation scientifique.

Pour essayer de comprendre pourquoi l'entropie augmente, il faut commencer par comprendre pourquoi une évolution peut être irréversible. On vient d'évoquer l'horloge sans frottement qui n'a donc jamais besoin d'être remontée. Les horloges réelles nous révèlent une première cause d'irréversibilité bien connue dans tous les systèmes physiques, qui est le frottement.

Si les horloges réelles pouvaient être sans frottement, tu n'aurais plus besoin de remonter les poids de ton coucou alsacien ; la raison pour laquelle tu dois les remonter de temps en temps est que dans un système réel, et non plus idéal, les frottements existent toujours malgré l'habileté des horlogers, et que, comme tu le sais, ces frottements se traduisent dans l'équation du mouvement par l'introduction d'un terme proportionnel à la vitesse, $f \cdot dx/dt$, qui n'est pas une dérivée paire, mais impaire, et change donc de signe si on change t en $-t$, ce qui conduit à un mouvement oscillatoire amorti, dont l'amplitude diminue avec le temps, jusqu'à s'arrêter. Si tu n'as pas remonté ton horloge et que tu lances le balancier, tu vas le voir osciller de moins en moins haut, puis s'arrêter.

Donc si tu filmes une séquence de fonctionnement de ton horloge réelle non remontée et que tu la passes à l'envers, le spectateur attentif remarquera que les amplitudes des oscillations du balancier croissent avec le temps, ce qu'il jugera avec raison impossible ; il détectera donc la supercherie et vérifiera visuellement que l'évolution d'une horloge non remontée est irréversible. En fait, tu la remontes de temps en temps, et en remontant ses poids, tu lui apportes sous forme d'énergie potentielle l'énergie qu'elle a perdue par frottement sous forme de chaleur transmise à l'air de ton appartement pendant toute sa marche depuis le remontage précédent.

- Ou bien vous me prenez pour une débile, ou bien vous tenez vraiment tous les deux à me simplifier la vie ; vu sous l'angle des échanges de chaleur avec Robin et du frottement avec vous, professeur, j'ai l'impression d'enfoncer des portes ouvertes et d'avoir toujours compris sans m'en douter ce qu'est l'entropie et l'irréversibilité, comme monsieur Jourdain faisait de la prose sans le savoir, mais si c'était aussi simple, tous les lycéens sauraient ce qu'est l'entropie avant le bac. J'imagine qu'il y a d'autres choses un peu plus subtiles là derrière.

- Bien sûr ! et j'y arrive. Il existe une seconde cause d'irréversibilité plus cachée mais plus essentielle que le frottement, et qui celle-là existe même en l'absence de frottement, c'est la **complexité**. Pour bien comprendre cette seconde cause plus subtile, mais plus fondamentale, je vais te faire jouer au billard :

imagine une boule de billard roulant sans frottement (ce qui est une contradiction car s'il n'y avait aucun frottement, elle glisserait sans rouler, mais on peut aussi bien l'imaginer glissant) sur un billard idéal, cognant une autre boule immobile qu'elle rencontre, puis rebondissant toutes deux par des chocs parfaitement élastiques sur les bandes ; si tu filmes cette courte séquence et que tu la passes à l'envers, tu n'y verras rien qui puisse heurter ton bon sens, de même que dans le film de l'horloge sans frottement. Tu ne seras pas surprise de voir en temps inversé deux boules rebondir sur les bandes car le phénomène du rebond est exactement le même en inversant la vitesse et le temps ; tu seras juste un peu surprise que les deux boules arrivant l'une vers l'autre après un rebond sur les bandes puissent se choquer en en laissant une immobile sur place, toute l'énergie cinétique préexistante dans les deux boules étant captée par une seule après le choc. C'est un événement peu probable, mais il arrive de temps en temps au billard et tu diras seulement : voilà un beau coup ! C'est une séquence encore réversible.

Je te propose de passer progressivement de la notion de réversibilité à celle d'irréversibilité en continuant à jouer au billard, en augmentant simplement un peu le nombre de boules. Suppose maintenant deux boules A et B préalablement posées sur le billard ; avec une troisième boule C que le joueur tire sur A ; le rebond envoie C ou A cogner B, les trois boules roulant ensuite vers les bandes et rebondissant sur elles. Si tu filmes cette petite séquence et que tu inverses le temps en passant le film à l'envers, tu commenceras à être un peu plus surprise que dans le cas précédent en voyant trois boules arriver, rebondir sur les bandes, deux se cognant en en laissant une sur place, puis celle restant mobile, accélérée par le premier choc cognant la troisième et la laissant également sur place en accélérant encore par l'énergie cinétique prélevée successivement sur les deux autres. Tu te diras : voilà un coup incroyable.

Comme tu n'as joué qu'avec trois boules, tu peux imaginer facilement que dès que tu passes à un nombre de boules supérieur, une séquence de jeu filmée et revue à l'envers te semblera de plus en plus hautement improbable, ce sera donc une séquence de plus en plus irréversible, malgré l'absence de frottement.

Si maintenant tu extrapoles en remplaçant les boules par les molécules d'un gaz qui s'entrechoquent et rebondissent contre les parois, le nombre incroyablement élevé de ces molécules te convaincra aisément qu'une molécule arrivant à grande vitesse dans ce gaz de boules va cogner un très grand nombre d'autres molécules en y perdant une partie de son énergie cinétique qui va s'uniformiser avec celles des autres, alors que la séquence inverse où la multitude des chocs des molécules en mouvement brownien conduiraient à accélérer et éjecter une seule de ces particules est très hautement improbable et présente donc un degré d'irréversibilité incroyablement élevé, malgré le caractère parfaitement réversible des chocs élastiques entre les molécules à l'échelle microscopique.

À l'étape suivante de la compréhension de l'irréversibilité, tu reprends maintenant la boîte de Robin contenant dans une partie un gaz à la température de 200K, dont les molécules s'agitent gentiment en s'entrechoquant et rebondissant sur les parois de leur compartiment, et dans l'autre un gaz à 600K dont les molécules s'agitent beaucoup plus vite. Si tu supprimes la paroi de séparation, les molécules plus énergétiques du gaz chaud vont enfoncer le front des molécules plus lentes du gaz froid, leur communiquer progressivement par leurs chocs élastiques une vitesse plus grande et perdre de la leur, jusqu'à uniformisation à une vitesse moyenne correspondant à 400K, qui est un état d'équilibre.

Pourquoi est-ce un état d'équilibre ?, alors qu'on pourrait imaginer comme pas tout à fait impossible une séquence inverse analogue à celle de la boule de billard accélérée de tout à l'heure ; il n'est pas inimaginable qu'une suite d'extravagantes coïncidences sur les chocs intermoléculaires puisse accélérer une moitié des particules et les reconcentrer spontanément à l'état de gaz chaud dans une moitié de la boîte, l'autre moitié restant plus froide puisqu'elle a usé son énergie cinétique à accélérer les molécules de la partie ainsi réchauffée. Ce n'est pas inimaginable, mais extrêmement improbable.

Cela t'explique pourquoi ce qu'on appelle la chaleur s'écoule d'un corps chaud vers un corps froid et jamais l'inverse, ce que tu avais probablement considéré jusqu'alors comme une évidence n'appelant pas une explication, mais qui s'explique clairement par ce mécanisme et constitue la base de la notion d'entropie.

Tu peux utiliser le même raisonnement en remplaçant la différence initiale de température par une différence de pression, ce qui ramène au même problème des vitesses des molécules.

Ce qui se dégage de ce regard sur ton coucou et sur ces parties de billard avec un nombre de boules croissant, c'est que la réversibilité ne peut exister que pour un système sans frottement, et surtout un système simple. Dès que le nombre de composants du système s'élève, la probabilité d'apparition d'une séquence inverse dans le temps diminue fortement. L'irréversibilité est donc finalement une mesure de l'improbabilité, l'improbabilité étant elle-même une conséquence de l'intervention d'un très grand nombre de composants, donc de la complexité.

Notre cartésianisme nous a trop accoutumés à tout classer en blanc ou noir et à manipuler des catégories absolues plutôt que des probabilités, à penser qu'un phénomène est soit réversible, ou soit absolument irréversible, sans possibilité intermédiaire, alors qu'on vient de voir que l'on peut pénétrer dans l'irréversibilité de façon graduelle. C'est certainement plus facilement compréhensible par un chinois dont la langue permet d'exprimer différents degrés d'absolus puisque absolument peut se dire en chinois wan qui signifie dix mille, qui est encore assez loin de l'absolu, ou peut aussi se dire qian wan qui signifie mille fois dix mille, soit un million, qui s'en rapproche et prépare bien l'esprit aux probabilités, ou même encore wanquande lorsque l'on est tout à fait certain du résultat, et est la traduction la plus proche de notre absolu cartésien en signifiant mot à mot totalement réalisé.

Je reviens par ce détour à ton étonnement que l'entropie soit liée à la flèche du temps. Tu vois que les phénomènes réels irréversibles se déroulent uniquement dans le même sens que le temps qui est un paramètre nécessaire de leur description, ils ne peuvent pas se dérouler en sens inverse, contrairement aux réversibles. Si tu te hausses d'un degré dans la réflexion, tu peux en conclure que c'est l'existence même de ces phénomènes irréversibles qui n'existent qu'à notre échelle macroscopique, qui induit dans nos esprits la notion de temps et qui permet de fixer un sens d'écoulement objectif au temps, donc sa flèche.

La nature nous offre ce phénomène de l'irréversibilité, qui n'apparaît qu'à notre échelle macroscopique, la flèche du temps en est la conséquence.

- Alors si je reviens à mon horloge idéale réversible, réfléchit Grisella, cela veut dire que moi, observatrice extérieure environnée de phénomènes irréversibles, les ressentant même dans mon propre corps, je prends conscience d'un temps fléchi et étalonné par ces phénomènes irréversibles, et dans ce temps-cadre qui est le mien, je vois se répéter les oscillations du balancier de mon horloge réversible, que je situe comme un phénomène réversible rare dans mon propre temps irréversible, par une attitude anthropocentriste, alors que si j'essaie d'imaginer ce que je penserais du temps si j'étais le balancier pensant de cette horloge idéale réversible, montant à droite, m'arrêtant, descendant à l'envers en accélérant puis remontant à gauche, m'arrêtant puis redescendant à l'envers en refaisant éternellement ces mouvements alternés, je penserais que le temps est quelque chose qui avance, puis recule, et recommence sans cesse d'avancer et de reculer; en aucun cas je ne lui attribuerais ce caractère de déroulement continu à sens unique que nous lui attribuons.

- En effet, Grisella, je crois que ton balancier pensant ressentirait le temps de cette manière cyclique.

- Alors notre enquête sur le temps d'hier matin était incomplète et il faudrait la reprendre pour introduire cette nouvelle perspective.

- Oh là ! intervint Robin, tu sais qu'on est parti pour une rando, pas pour un séminaire d'été, il me semble qu'on a déjà enregistré pas mal de choses hier sur le temps pour ne pas reprendre le sujet.

- En fait, je crois qu'il suffit d'un ou deux commentaires additionnels pour le conclure, tempéra Kirgard, on pourrait dire que l'analyse de notre perception du temps conduit à la fonder sur l'irréversibilité de l'évolution des phénomènes que nous observons, irréversibilité mesurée par l'entropie, qui est une conséquence de la complexité de notre monde formé d'un nombre fantastiquement élevé de particules en mouvement.

On peut alors résumer et clore nos discussions d'hier sur le temps et l'espace en disant que :

- L'existence de la matière et de sa structure atomique, formée d'un nombre incroyablement élevé de particules, entraîne l'irréversibilité des phénomènes, et donc l'existence d'une flèche du temps, imagée par l'entropie (je vous rappelle en passant que le terme entropie porte en lui sa signification profonde, puisque c'est un mot grec qui signifie "cause d'évolution").
- Cette orientation du temps n'est donc pas une propriété donnée à priori de l'espace-temps seul, c'est une propriété de la matière-espace-temps.

Certains phénomènes n'apparaissent que lorsque nous nous situons à l'échelle macroscopique, le temps en est un.

- On nage vraiment dans l'existentialisme, soupira Grisella.

- Je te propose de recentrer le débat sur l'entropie elle-même plutôt que de philosopher sur sa relation avec le temps, reprit Robin, car ce que vient de t'expliquer le professeur est issu des travaux de Boltzman qui a établi cette interprétation microscopique de l'entropie, à l'échelle des particules, que je trouve personnellement beaucoup plus éclairante que la formulation macro de Clausius.

Boltzman a résumé son interprétation dans sa formule célèbre, qui figure sur sa tombe à Vienne : $S = k \log W$, exprimant que l'entropie S est le logarithme du nombre énorme W des différents arrangements possibles des microcomposants du système pouvant conduire aux mêmes caractéristiques globales de la macrostructure, arrangements qui se comptent par milliards lorsqu'il s'agit par exemple des positions et vitesses des molécules d'un gaz, mais les logarithmes ont justement été inventés pour manipuler des grands nombres sans se perdre dans les zéros.

Tu conçois bien que pour un état donné d'un gaz par exemple, caractérisé par des grandeurs globales macroscopiques telles que la pression, le volume, la température, le nombre W des positions et vitesses des molécules qui permettent de réaliser ce même état global mesurable au niveau macroscopique, est gigantesque. Si tu considères une boîte ayant deux compartiments, l'un rempli d'un gaz et l'autre vide, et si tu perces la paroi les séparant, tu te doutes que le gaz va très vite remplir les deux compartiments ; pourquoi ? Parce que le nombre W_2 des multiples configurations microscopiques des positions et vitesses offertes au gaz par le volume total est de très loin supérieur au nombre de configurations W_1 offertes par un seul compartiment. Autrement dit, il y a tellement de manières possibles de réaliser ce nouvel état macro que sa probabilité d'apparition est plus grande.

A travers le logarithme de ce nombre W , plus facile à manier, l'entropie S mesure donc en quelque sorte la probabilité relative que cette nouvelle situation macroscopique puisse s'établir ; comme en moyenne ce sont les événements les plus probables qui surviennent, tu ne dois pas t'étonner que l'entropie augmente au cours d'un événement quelconque où le nombre d'arrangements microscopiques équivalents peut passer d'un nombre W_1 à un nombre W_2 plus grand que W_1 (donc $\log W_2$ supérieur à $\log W_1$) puisque cette entropie égale à $\log W$ mesure justement la probabilité qu'avait cet événement d'arriver.

- Tu m'as un peu saoulée, Robin, ta présentation ne manque pas d'élégance, mais *quid* de cette relation avec le désordre ? ce n'est pas encore très limpide pour moi, je vois bien que l'entropie tire vers l'uniformité parce qu'elle annonce l'arrivée des événements les plus probables, mais pourquoi tire-t-elle aussi vers le désordre ? insista Grisella en se tournant vers Noël qui baillait en s'étirant voluptueusement.

L'entropie n'a pas l'air de t'exciter beaucoup, Noël ?

- Non, parce que je suis plutôt contre.

- Voilà un combat perdu d'avance, mon pauvre Noël, opina Robin.

- On le dit ! , mais je n'aime pas cette idée, et l'entropie m'ennuie ; mais pour me réveiller, je vais tout de même essayer de répondre à ma manière à la question de Grisella sur le désordre que je vois plutôt comme un problème de définition du mot désordre.

Sans aller jusqu'aux milliards de milliards de particules du gaz dont Robin vient de te submerger, tu n'as qu'à considérer plus simplement un simple jeu de 32 cartes ; il existe un nombre déjà gigantesque de façons de classer ces cartes, égal à factorielle 32, soit $32! = 32.31.30.29....3.2.1$, qui conduit à $2,63....10^{35}$ états possibles.

Si je décide de mettre de l'ordre dans ce jeu en séparant les quatre couleurs et en classant les cartes par ordre croissant dans chaque couleur, je n'ai par contre qu'une seule manière de réaliser cet état *ordonné*, parmi les $2,63....10^{35}$ possibles. Il existe donc $(2,63....10^{35} - 1)$ états que j'appelle *désordonnés*. Si après cet effort de mise en *ordre*, je relâche cette contrainte en laissant tomber le jeu de cartes par terre, la petite seconde de chute verra l'évolution naturelle de l'entropie me foutre par terre dans un désordre évident l'ordre que j'avais instauré. Dans cette acception, le terme *désordre* recouvre un peu celui de *distribution au hasard*, et aussi à nouveau celui d'*état le plus probable*, parce qu'il existe un nombre W égal à $(2,63....10^{35} - 1)$ d'états désordonnés possibles d'un jeu de cartes, contre un seul état ordonné, donc il est beaucoup plus probable, par le tirage au hasard que constitue la chute, de tomber sur un de ces très nombreux états désordonnés que sur le seul état ordonné. Bien sûr, on ne peut pas exclure totalement que le jeu se retrouve par terre dans cet état ordonné, même si tu l'avais lâché en état désordonné, mais tu n'as qu'une chance sur $2,63....10^{35}$ de réaliser ce miracle.

Tu remarqueras toutefois en passant le caractère subjectif de ce qu'on définit par *ordre* dans l'exemple que j'ai utilisé, car l'ordre que j'ai indiqué n'est pas celui des valeurs du bridge ni de la belote. C'est un ordre arbitrairement choisi. Dans le contexte de l'entropie, ce qu'on appelle l'ordre est un classement en catégories bien distinctes, arbitraires ou non, dont il suffit de continuer à prendre quelques exemples pour mieux comprendre.

Si je reviens au mélange des températures du corps chaud et du corps froid dont Robin a parlé, on doit supposer que préalablement à ce mélange, quelqu'un avait classé le système en deux catégories de vitesses des particules, le corps chaud d'un côté avec ses particules à grande vitesse, et le corps froid de l'autre avec des vitesses plus faibles. La mise en contact des deux constitue le relâchement de la contrainte qui les séparait, et permet aux molécules de s'entrechoquer dans leur mouvement brownien et d'égaliser progressivement leurs vitesses, donc la température. Là encore le terme *désordre* signifie *uniformité, non classement, et état le plus probable*.

Tu peux remplacer les molécules chaudes et froides par des molécules d'azote et d'oxygène et passer là aussi de l'ordre au désordre ; tu peux remplacer les molécules par deux jeux de cartes, l'un ne contenant que les cartes de cœur, l'autre tout le reste, en battant ensemble les deux jeux, tu passeras là encore de l'ordre initial par classement imposé, au non classement, au désordre.

Si je classe le monde en montagnes et en plaines, bien différenciées par une contrainte initiale qui est le bouleversement tectonique de leur formation, et si j'appelle cela un monde en *ordre*, cette contrainte initiale étant relâchée, l'évolution naturelle par l'érosion au cours du temps qui passe est la plus probable et va niveler ce monde, réduisant puis annulant les différences d'altitude comme le mélange d'un liquide chaud et d'un liquide froid donne un liquide tiède par annulation des différences de température, c'est l'augmentation d'entropie qui fait là encore son œuvre souterraine, et le terme employé est *aller vers le désordre* par la disparition progressive des différences qui constituaient la définition de l'ordre.

Si je laisse tomber cette pierre sur le sol, toutes ses particules ont pendant la chute une vitesse moyenne *ordonnée* vers le bas ; en arrivant au sol, ces particules perdent leur vitesse moyenne ainsi que l'énergie cinétique correspondante, en la communiquant aux particules du sol, qui par entrechoquements successifs vont s'agiter un peu plus et diluer cette énergie mécanique en énergie thermique désordonnée qui chauffe légèrement le sol au point d'impact. Au total, l'énergie s'est conservée, mais on est passé d'une énergie mécanique noble à une énergie dégradée. L'énergie noble, parce qu'ordonnée, permettrait d'en faire quelque chose, par exemple de l'énergie mécanique en faisant tomber la pierre à travers un mécanisme qu'elle entraînerait, comme l'eau qui tombe dans une turbine entraîne un alternateur qui génère de l'électricité, alors que l'énergie thermique est une énergie dégradée parce qu'elle correspond à des vitesses désordonnées des particules, dont on ne peut plus rien tirer d'intéressant. L'entropie a augmenté et amené le *désordre*.

Inversement, si tu chauffes le sol à l'endroit où est tombée la pierre, tu ne pourras jamais la faire jaillir du sol parce que tu ne communique par chauffage qu'un mouvement désordonné qui ne peut pas se transformer en mouvement ordonné, ou plus exactement qui n'a qu'une probabilité infime de se transformer en mouvement ordonné. C'est là que s'exprime la fausse équivalence entre travail et chaleur, car le travail se dégrade en chaleur avec une aisance remarquable alors qu'on ne peut pas transformer de la chaleur en travail à partir d'une seule source de chaleur.

Pour transformer de la chaleur en travail, une seule source de chaleur ne suffit pas, il en faut deux, une source chaude à température T_c et une source froide à température T_f ; en les mettant en relation, on superpose à l'agitation thermique de chacune des sources un déplacement d'ensemble de matière de la source chaude vers la source froide, d'où l'on peut tirer une force motrice. Le rendement que l'on peut alors tirer de cette transformation d'énergie thermique en énergie mécanique est au

maximum de $1 - T_f / T_c$, formule qui montre clairement qu'avec une seule source $T_f = T_c$, ce rendement est nul, et que même avec deux sources, le rendement reste toujours très en dessous de l'unité, entre 0,2 et 0,4 pour la plupart des moteurs thermiques.

Tu vois que la notion d'énergie ne suffisait pas pour qualifier tous les phénomènes qui l'on peut observer dans la nature, et que la notion d'entropie introduit quelque chose de nouveau, qui est un repérage du niveau de qualité de cette énergie ; l'augmentation de l'entropie n'est rien d'autre que la diminution de l'énergie *utilisable* ; c'est une notion finalement plus qualitative que quantitative, qui aide à prédire dans quel sens les choses vont se passer, et permet de déceler les évolutions interdites.

Maintenant je vais te dire pourquoi je n'aime pas beaucoup cette notion d'entropie, c'est parce qu'elle me semble être aveugle sur les phénomènes les plus essentiels à mes yeux. Je m'explique :

La grande loi de l'entropie impose qu'elle augmente dans un système isolé, mais elle n'interdit pas que localement, dans un sous-ensemble de ce système, on mette de l'ordre, on classe, on symétrise, on fasse de l'organisation intelligente, de la beauté, de la vie, ce qui réduira localement l'entropie ; on fabriquera ainsi localement de l'entropie négative, de la "néguentropie", sachant que cela sera certes obligatoirement payé dans le reste du système isolé par une production d'entropie supérieure à la néguentropie créée dans le sous-système.

Je n'aime pas l'idée que l'entropie dirige le monde parce que cette idée n'exprime que l'évolution globale du monde de la matière, et fait fi des multiples concentrations momentanées et locales de néguentropie que sont les créations de l'esprit, les mises en ordre, que ce soient des mises en ordre matérielles ou sociétales comme les pyramides d'Egypte et tous les grands monuments ou les grandes dynasties et civilisations, les mises en ordre des idées par les grands savants et penseurs, les mises en ordre harmonieux des sons par les grands musiciens, toutes les créations artistiques. Les hors-norme, les non-uniformes font la richesse du monde. Dans la morne évolution du système global "monde" vers l'*uniformité-désordre*, ce sont ces créations locales et momentanées de néguentropie dont on se souvient, ce sont elles qui font l'histoire.

Le plus gigantesque acte de néguentropie fut le Big-Bang, création de l'univers, instant de remontage d'un énorme ressort, à partir duquel le temps s'est déroulé et l'entropie a certes commencé son œuvre de désorganisation progressive, mais tout au long de ce temps, des îlots de structures néguentropiques sont apparus, qui n'ont fait que se complexifier.

Il existe un domaine sur lequel l'entropie ne semble pas avoir une prise facile, c'est la vie qui est un miracle de création d'ordre architectural par le code génétique, et d'ordre fonctionnel par la coordination des milliers de réactions chimiques dans le métabolisme⁶⁶, par cette capacité des vivants, non seulement de maintenir dans le temps leur complexité structurale et fonctionnelle, mais, bien plus, de la multiplier en la transmettant à leur descendance⁶⁷. L'apparition de la vie sur Terre était un événement d'une très grande improbabilité, mais elle a eu lieu. Comment certaines coalitions de particules en sont venues à constituer des êtres pensants ? à travers un développement de l'embryon qui est un modèle d'organisation croissante et non de désorganisation entropique ? et à travers l'évolution des espèces vers toujours plus de complexité depuis les amibes initiales jusqu'à l'homme ? Tous les phénomènes de la vie échappent à la loi de l'augmentation d'entropie. Pourquoi cette multiplication d'improbabilités?, cette progression acharnée de l'improbabilité? Pourquoi une telle scission entre l'évolution thermodynamique aveugle vers

⁶⁶ Ilya Prigogine *hasard et nécessité* CD-ROM Encyclopædia Universalis 1999.

⁶⁷ Alain Delaunay *Néguentropie* CD-ROM Encyclopædia Universalis 1999.

la désorganisation et cette forme thermodynamiquement aberrante qu'est la vie ? Comment comprendre sous l'angle thermodynamique ce flux de matière et d'énergie qui entretient le métabolisme de nos corps en conservant l'ordre ? quel est ce précieux quelque chose incorporé à notre nourriture qui nous sauve de la mort ? c'est déjà de l'ordre, à travers d'autres corps vivants, végétaux et animaux, qui nous apporte de la néguentropie et retarde notre approche de l'entropie maxima, c'est-à-dire de la mort⁶⁸.

Ce sur quoi cette entropie envahissante reste muette, c'est aussi ce qui s'est passé avant le moment où on commence à comptabiliser son effet déstructurant ; il a bien fallu que ces structures soient d'abord mises en place pour donner à l'entropie un terrain d'action ! il a fallu que le jeu de cartes soit préalablement trié et classé, il a fallu d'abord séparer un corps chaud d'un corps froid, il a fallu que des mouvements tectoniques créent les montagnes, il a fallu un Big-Bang pour donner un début au temps, l'entropie l'ignore, ce n'est pas son affaire.

- Je commence à y voir nettement plus clair en écartant les différents voiles sous lesquels se masque l'entropie. Il en reste toutefois un à soulever, c'est celui de l'information, dont je ne vois pas bien la relation avec les autres aspects que nous venons de creuser. Qui veut bien m'éclairer ?

- Je vais essayer, dit Kirgard. Tu sais que les médias sont plus attirés par les événements sensationnels parce qu'improbables, que par ceux qui étaient très probables et dont la réalisation n'apprend rien parce qu'elle était attendue. Aucun journal ne mettra en titre de première page qu'il pleut sur Brest le 15 novembre, surtout si la météo le prévoyait depuis trois jours, parce que c'est un événement très probable qui n'apprendra rien à personne, alors que si un chaud soleil d'été était soudainement et inexplicablement localisé sur Brest et sa banlieue le 15 novembre, cette information ferait la une des médias à cause de son caractère de haute improbabilité.

Si tu veux un exemple moins idiot, aucun journal ne publiera que monsieur Dupont a joué au loto, et n'a pas gagné, parce que c'est l'événement le plus probable, alors que s'il a gagné avec les 6 numéros dans l'ordre, le journal peut le signaler comme une information d'intérêt, parce ce sont des événements improbables.

La valeur, le poids, la charge I_n de l'information sur une éventualité n est donc une fonction décroissante de la probabilité de réalisation p_n de cette éventualité. Plus la probabilité est faible, plus l'information est importante. Shannon a mis cela en équation et a exprimé ce poids (ou quantité) d'information sous la forme $I_n = k \log(1/p_n)$. Si tu compares cette formule à celle de Boltzmann $S = k \log W$, tu trouves une évidente ressemblance de forme ; comme la probabilité de chacune des W configurations dans la formulation Boltzmann est $1/W$, tu peux aussi écrire cette formule de Boltzmann sous la forme Shannon $I = k \log 1/1/W = k \log W$, et prendre conscience que I est alors la valeur (ou quantité) d'information qu'on devrait acquérir (ce qu'on ne sait pas faire) pour connaître complètement l'état microscopique d'un système macroscopique constitué de W configurations possibles.

Tu arrives alors à la conclusion que l'entropie S , sous son autre face I , mesure l'information qui nous manque par notre incapacité à déterminer exactement la configuration micro d'un système macro parmi les W configurations possibles. L'entropie S est la mesure de notre degré d'ignorance par manque d'information, due au caractère probabiliste de notre description à l'échelle microscopique⁶⁹.

Je n'attends pas que tu me demandes si c'est le même coefficient k dans les deux formules de Boltzmann et de Shannon, car je sens que tu vas le faire, alors je te dis tout de suite que ce n'est pas cela l'important ; l'important est dans la similitude des lois et l'interprétation qu'elle permet. La valeur de k dépend du système d'unités adopté. Le k de l'entropie Boltzmann a été étalonné pour faire coïncider sa valeur avec celle de l'entropie Clausius, il vaut $1,38 \cdot 10^{-23}$ Joule par Kelvin. Si on avait mesuré les températures en unités d'énergie, l'entropie aurait été une grandeur sans dimension. En théorie de l'information, il est plus naturel puisque k représente alors l'unité d'information, de convenir que l'information I_n acquise par un tirage à pile ou face est égale à 1, alors que sa probabilité p_n est égale à $1/2$; ce choix d'unités, le "bit", qui est celui de l'informatique, conduit à $k = 1/\log 2$ pour le k de Shannon.

- Dis donc, Grisella ! tu as eu droit à un cours privé sur l'entropie, j'espère que tu es rassasiée et qu'on va pouvoir maintenant attaquer la paroi, car le soleil commence tout de même à grimper, conclut Robin en se levant et en ramassant son sac à dos.

⁶⁸ Erwin Schrödinger *What is life* cit. dans *Néguentropie* CD-ROM Encyclopædia Universalis 1999.

⁶⁹ Roger Balian *Le temps macroscopique*, p185, dans *Le temps et sa flèche* Champs Flammarion 1996

- Oui, merci à mes trois professeurs, je crois que j'ai à peu près tout compris, même pourquoi la bourse s'était momentanément emballée sur les actions des sociétés d'informatique et de communication, et non plus sur celles des machines à vapeur, cela me semble être à l'image des interprétations successives de l'entropie, car la première néguentropie cotée en bourse au siècle dernier était la force motrice à partir de la vapeur, alors que maintenant c'est la néguentropie de l'intelligence d'organisation et de l'optimisation générale de tout ce qui peut l'être par une meilleure information/communication qui tient le haut du pavé de l'organisation sociétale.

11

Esprit, où es-tu ?

Ce fut une deuxième longue marche d'approche au milieu des pierriers par un sentier contournant une vaste dépression où l'érosion avait amoncelé des pierres roulantes dans un amas confus sur lequel un petit névé persistait encore. Le sentier grimpait ensuite en lacets serrés entre les grandes roches des dernières pentes très raides séparant la face nord de la face sud brillamment éclairée. Passée cette crête, ils découvrirent d'un coup le paysage qui s'étendait au sud de l'Obiou, avec son frère quasi symétrique le Grand Ferrand, plus bas de quelques mètres seulement, planté sous leurs yeux à moins de dix kilomètres à vol d'oiseau, dominant la cuvette de Tréminis et ses riches alpages.

Ils contournèrent le sommet par le sud, longeant les précipices de cette face plus abrupte où le chemin bien frayé passait en alternance sous des surplombs ombreux et dans des dégagements où le soleil cuisait la peau.

- Encore un quart d'heure et nous y sommes! clama Robin.

A 2800 mètres d'altitude, c'était le même tas de cailloux éclatant de blancheur que le sommet du Grand Ferrand, mais il n'était pas aussi vierge car un panneau solaire alimentant une petite installation de télécommunication par satellite y avaient été implantés.

- C'est insolite, dit Grisella, l'esprit semble régner en ces lieux élevés.

Ils déballèrent les provisions du repas de midi en cherchant le moindre coin d'ombre près d'une antenne parabolique pour s'y installer plus confortablement.

- On peut vider nos sacs et ne garder qu'un peu de boisson pour descendre, ce soir nous retrouvons la maison et nos lits, commenta le professeur qui sentait avec gourmandise l'approche de l'écurie.

Le repas fut donc abondant, mais malgré les appétits de la jeunesse, on ne pouvait, comme à chaque randonnée, vider les sacs à dos, et on rapportait toujours à la maison quelques restes de saucisson et de jambon sec.

Dans l'ombre étroite de la parabole à cette heure où le soleil au Zénith dardait ses feux, ils s'allongèrent pour la sieste, dans un silence agrémenté par le murmure d'un vent léger dans les antennes.

Au bout d'un quart d'heure de sieste silencieuse, Noël les sortit de leur torpeur:

- Puisque vous avez osé aborder le sujet de la beauté ce matin, aurez-vous l'audace cet après-midi de clore nos débats montagnards en restant dans la même veine et en frôlant le sujet de l'esprit, pour essayer de voir si on peut oser être encore un peu platonicien de nos jours, au milieu de cet arsenal d'analyses scientifiques qui ne donnent pas droit de cité à autre chose qu'à l'étude des phénomènes physiques et délaissent délibérément le psychique. Que peut-on dire d'assuré sur ce qu'est l'esprit, dont nous venons de nous servir tous ces jours pour essayer de mieux comprendre le monde des phénomènes physiques?

- Quelle ambition, mon pauvre Noël ! Tu ne trouves pas notre enquête assez embrouillée comme cela? Ce que tu demandes m'a d'ailleurs un peu des allures de cercle vicieux, opina Grisella, mais Platon ne m'y semble pas aussi "défait" que Claude Allègre a pu l'écrire dans sa "Défaite de Platon", car Kirgard nous a amplement montré que dans les tentatives de compréhension de la matière aux limites extrêmes du micromonde, cette matière semble perdre sa substance et commence à ressembler à l'esprit ; on y est de plus en plus guidé par certaines idées émises à priori, telles que les symétries, idées frôlant l'esthétique ; on peut alors se demander si ces modèles imaginés pour représenter ce micromonde sont bien une image fidèle de la matière, ou si elles ne sont pas plutôt un reflet de notre propre pensée, et j'y retrouve un peu ton cher Platon. Et toi tu suggères d'aller encore plus loin et d'utiliser notre esprit pour analyser cet esprit, je crois que nous abordons là une sorte de cercle vicieux plutôt métaphysique. Pense un peu à l'humilité désespérée de Pascal que rappelait le professeur dans sa déprime d'hier soir : " je ne sais ce que c'est que cette partie de moi qui pense ce que je dis, qui fait réflexion sur tout et sur elle-même, et ne se connaît non plus que tout le reste".

- Sans doute, regretta Noël, mais je trouve dommage que ce relent de cercle vicieux nous gêne pour tenter des approches physiques à l'analyse de l'esprit, au delà ou à côté des approches biologiques où il me semble que l'on fait surtout du repérage expérimental des lieux où il se passe des événements psychiques, avec le cerveau reptilien, le système limbique, le cortex et les rôles spécifiques de ses hémisphères droit et gauche, plutôt qu'une recherche fondamentale sur le mécanisme même de la pensée. J'ai l'impression qu'aucun physicien ne s'y est risqué, craignant sans doute d'être mis au ban de la confrérie par des collègues qui s'attachent exclusivement à l'analyse des phénomènes physiques, et je trouve cela dommage.

- Il y a tout de même quelques physiciens audacieux qui ont osé prendre ce risque d'imaginer des chemins pour pénétrer à tâtons dans le monde de l'esprit, corrigea Kirgard ; On doit reconnaître leur immense audace et beaucoup leur pardonner pour certaines prises de position indémonstrables, en cherchant plutôt dans leurs travaux les quelques filons d'idées neuves qu'il n'est pas aisé de refouler à priori et méritent d'être explorés.

- Vous nous intriguez, professeur, s'emballa Noël, ouvrez-nous un aperçu sur ces idées.

- Je peux essayer de vous brosser quelques unes des idées de base de l'un d'entre eux, Jean Charon, qui me semble être allé très loin dans le risque, mais considérez que nous ne sommes plus dans l'enquête de la police scientifique officielle, mais plutôt dans une enquête parallèle d'un privé proposant des vues tout à fait nouvelles sur la structure de l'esprit et son mode de fonctionnement. Pour notre dernière séance, nous pouvons nous permettre

d'évoquer ce que j'ai compris du "monde selon Charon", une espèce de science-fiction de haut niveau qui n'a pas recours aux inévitables humanoïdes extra-galactiques chevauchant les vaisseaux spatiaux de la S.F. banale, et qui essaie de coller au plus près des connaissances actuelles en microphysique.

Ce privé, Charon, était gêné par la difficulté d'attribuer un contenu physique tel qu'une masse ou un spin, qui je vous rappelle a la dimension d'une "action"(c'est-à-dire une énergie appliquée pendant un temps), à une particule comme l'électron, qui par ailleurs doit être assimilable à un point "mathématique" d'espace, donc de volume nul ; comment faire tenir des grandeurs aussi physiques dans un espace nul ? Il imagina alors que ces grandeurs ne se situent peut-être pas dans ce "point", mais se cachent "ailleurs" que dans notre espace-temps ordinaire qui nous amène à considérer cette particule comme un point, dans un autre espace-temps juxtaposé⁷⁰. Ces deux espaces-temps juxtaposés seraient un peu comme deux sphères tangentes en un point ; vu de notre sphère de l'espace-temps ordinaire, le monde de la sphère extérieure de l'électron n'apparaîtrait que comme le point de contact des deux sphères.

Il proposa alors une extension de la théorie de la Relativité Générale⁷¹ en posant que l'espace-temps est de nature complexe, au sens mathématique du terme. Ce nouvel espace-temps complexe est alors décomposable en deux espaces-temps juxtaposés, l'un correspondant à la partie réelle, qui est celui de notre monde de la matière, l'autre correspondant à la partie imaginaire, qu'il nomme "espace-temps de l'esprit". Cet espace-temps de l'esprit qui est passé inaperçu jusqu'alors se situerait à l'intérieur de certaines particules élémentaires entrant dans la constitution de la matière.

Quelles particules ? Vous avez compris à travers nos révisions de ces dernières soirées qu'on peut interpréter les particules comme de l'espace-temps plus ou moins courbé. L'intensité et le rayon d'action des forces d'interaction de ces particules nous donnent une idée de la courbure locale qui leur est associée.

Du côté des particules lourdes, les hadrons, qui ne sont pas ponctuels, et qui agissent par l'interaction forte de très courte portée, peuvent être vus comme une déformation locale très profonde de l'espace-temps, une sorte de doigt de gant tourbillonnant s'enfonçant localement, mais restant ouvert à sa surface, car la portée de l'interaction étant très courte, seul le bord immédiat du doigt de gant est fortement courbé alors qu'à une certaine distance du hadron, la force forte n'a plus d'action et l'espace-temps n'est plus déformé⁷².

A l'autre extrémité de la gamme des particules, celles qui n'ont pas de masse, comme le photon et le neutrino, ne déforment pas l'espace-temps ; ce sont des particules cinétiques qui sont obligées de circuler à la vitesse de la lumière et ne doivent leur énergie qu'à cette vitesse très particulière.

Entre les deux sont les leptons chargés, dont le seul représentant stable actuel est l'électron, ponctuel, mais massif, si faible que soit sa masse. Charon pense avoir montré par ses travaux que l'espace entourant l'électron est à ce point déformé par cette masse si ponctuelle qu'il se referme sur lui-même en constituant un micro trou noir, contenant un micro-univers refermé sur lui-même, emprisonnant dans cette "bulle" son propre espace-temps spécifique. Il faut comprendre "refermé sur lui-même" au sens de la Relativité Générale, c'est-à-dire muni d'un espace indépendant de notre propre espace, sans possibilité de communication directe entre cet espace interne de l'électron, et notre espace de la matière.

Rappelez vous les trous noirs d'hier soir, ils contiennent eux aussi un espace-temps différent et sans communication possible avec le nôtre. De la même manière qu'un trou noir se forme à partir d'une matière hyperdense dont l'attraction gravitationnelle "courbe" l'espace jusqu'à le refermer sur lui-même en une sorte de poche, de bulle, enfermant un monde inconnaissable, les électrons, quasi ponctuels, formés d'une matière dont la densité est du même ordre de grandeur que celle des trous noirs, peuvent être soupçonnés d'être des "micro trous noirs" ayant creusé dans notre espace-temps des bulles où règne un espace-temps différent du nôtre, que Charon qualifie d'espace-temps de l'esprit.

Pourquoi cet espace-temps est-il différent du nôtre ? Continuons l'analogie: si vous imaginez de pénétrer en fusée dans un trou noir en traversant la barrière de Schwarzschild, il n'est plus question à partir de cette limite d'utiliser librement un espace à trois dimensions tel que nous le connaissons ; quelle que soit la puissance disponible pour propulser votre fusée, elle n'aura plus d'autre choix que de suivre la voie qui lui sera imposée par l'hypergravité, et progressera sans cesse en avant sur une seule dimension, sans possibilité de faire marche arrière.

A l'intérieur du trou noir, l'espace devient donc unidimensionnel et fléchi comme l'est ici notre temps ; il y a en quelque sorte inversion des rôles du temps et de l'espace .

Et le temps du trou noir ? Une interprétation des équations de la Relativité Générale est qu'après avoir franchi l'œil d'un trou noir, la fusée ne va pas s'arrêter sur une sorte de limite de l'espace, une singularité ; elle va droit devant elle dans cet univers fermé, et de même que si vous allez droit devant vous sur la Terre, vous vous retrouverez au point de départ après un tour de la planète, la fusée va repasser devant l'œil du trou noir au bout d'un temps T , puis refaire perpétuellement le même trajet dans cet univers interne du trou noir, ce qui signifie que le temps y devient cyclique, comme celui du pendule idéal, et qu'à chaque période T , les mêmes événements seront revécus dans un temps répétitif, contrairement à notre temps fléchi à un seul parcours irréversible.

⁷⁰ Jean.E.Charon *L'ESPRIT, cet inconnu* Albin Michel 1977

⁷¹ Jean.E.Charon *Théorie de la Relativité Complexe* Albin Michel 1977

⁷² Jean.E.Charon *L'ESPRIT, cet inconnu* p 84 Albin Michel 1977

Si on considère maintenant le "micro trou noir" de l'électron, il contient de la matière hyperdense qui lui donne sa masse et courbe son espace-temps en le fermant en bulle ; il contient aussi du rayonnement, à une température de l'ordre des milliards de degrés, sous forme d'un gaz de photons, ces fameux photons virtuels entourant l'électron dont nous avons parlé hier, et son espace interne, qui tourbillonne comme celui de toutes les particules, pulse à un rythme d'environ 10^{23} périodes T par seconde.

Alors, d'une manière un peu semblable à ce qui se passe pour la fusée circulant dans un trou noir, Charon admet qu'à chacune de ces périodes T extrêmement courtes, tout événement enregistré dans le monde de l'électron à un temps t sera revécut aux temps $t + T, t + 2T, t + 3T$, etc, constituant une sorte de mémoire des événements, une accumulation d'informations au cours de l'écoulement du temps, tous les événements/informations acquis par le monde de l'électron restant mémorisés.

- J'aimerais comprendre comment ce micro-univers fermé de l'électron peut enregistrer des informations extérieures puisqu'il est justement fermé, questionna Noël. Il me semble que vous avez passé un peu vite sur le mécanisme d'acquisition d'information et de mémorisation.

- L'explication de Charon fait appel au nuage de photons virtuels qui accompagne l'électron. Ces photons virtuels sont inobservables, et Charon semble les considérer comme faisant partie du micro-univers de l'électron dont ils constituent le rayonnement interne. La force de répulsion entre deux électrons est alors interprétée comme un "échange à distance" de photons de vitesses égales et opposées entre les deux espaces-temps indépendants des deux électrons, semblable à une communication par télépathie, et non plus comme l'interférence dans notre seul espace-temps des deux nuages de photons virtuels accompagnant les deux électrons.

Pour l'acquisition d'informations en provenance du monde externe par le monde interne de l'électron, Charon fait appel au concept de spin. Je vous rappelle que les particules peuvent être vues comme des toupies astreintes à tourner sur elles mêmes à des vitesses précises dépendant de la masse de la particule, et telles que le produit de l'énergie de rotation par la période de rotation soit toujours un multiple de la moitié de la constante de Planck. C'est ce produit qu'on appelle spin, qui peut prendre les valeurs $1/2, 1, 3/2, 2 \dots$ ou $-1/2, -1, -3/2, -2 \dots$ suivant le sens de rotation.

La loi fondamentale qui va nous servir pour suivre la théorie de Charon est que dans un système isolé comprenant plusieurs particules, il y a conservation du spin total. Si vous considérez d'abord l'espace fermé de l'électron comme système isolé, il en ressort que dans le nuage de photons qui en fait partie, il sera possible à l'électron de changer simultanément les signes des spins d'un nombre pair de photons pourvu que chaque moitié de cette paire soit constituée de spins égaux et de signe opposé, puisque ce processus ne changera pas le spin total, et ne réclamera aucune énergie. L'électron est "libre" d'intervertir les spins de ses photons virtuels aussi souvent qu'il le "veut", c'est ce que Charon appelle la "réflexion interne" de l'électron.

Si maintenant vous considérez comme système isolé l'ensemble de cet électron et du monde qui lui est extérieur, si un seul photon de ce monde extérieur modifie son spin, un des photons internes de l'électron devra modifier le sien en sens inverse et de la même valeur afin de respecter la loi de conservation du spin total d'un système isolé. Dans ce cas, l'électron aura acquis une information qui lui aura été imposée par le monde extérieur. Ainsi un électron du "début du monde", dont le rayonnement interne était vierge d'informations externes, voit avec le temps qui passe les événements du monde extérieur se graver dans sa "mémoire" par modification du spin de certains de ses photons internes.

Or, l'électron est avec le proton une particule stable, dont la durée de vie est au moins du même ordre de grandeur que celle de notre univers. Cela signifie que les informations accumulées dans le monde de l'électron le sont depuis le début des temps et le seront jusqu'à la fin des temps. Au cours de ces temps, chaque électron a eu et aura l'occasion de faire partie d'atomes entrant dans des structures complexes, gazeuses, minérales, organiques ou vivantes ; on peut donc imaginer que le monde de l'esprit de l'électron se "souvient" de toutes ces vies auxquelles il a participé et que sa mémoire s'enrichit en informations avec le temps qui passe, donc sa néguentropie s'accroît et il est de plus en plus capable "d'agir" avec de plus en plus "d'intelligence" puisqu'il dispose de plus en plus d'informations, contrairement au monde de la matière où c'est l'entropie qui croît, allant vers le désordre par perte progressive d'informations.

Les implications philosophiques de ces vues sont immenses ; souvenez vous de cette idée que l'évolution des vivants est pilotée par l'égoïsme du gène, qui n'utilise les êtres vivants que comme le véhicule de sa propre éternité, ou du moins pérennité, eh bien dans cette audacieuse théorie de Charon, le pilier de l'aventure de l'évolution ne se situe plus au niveau déjà terriblement complexe du gène de l'être vivant, mais au niveau beaucoup plus élémentaire de l'électron, donc l'aventure de l'évolution ne se limite plus au vivant qui seul possède des gènes, mais s'étend à toute la matière puisque toute matière contient des électrons. Le règne minéral participe à l'évolution aussi bien que les règnes animal et végétal.

- Je ne vais plus oser marcher sur les cailloux du chemin, dit Robin d'un ton dubitatif, de peur que leur esprit se souviennent que je les ai maltraités.

- Finalement, on ressasse toujours les mêmes idées, ajouta Grisella, et il y a 2500 ans Thalès pensait déjà qu'une sorte de psyché pouvait habiter les pierres lorsqu'il disait : "toutes les choses sont pleines de dieux".

- Cette vision répond aussi à cette quête d'éternité qui hante l'homme, toutes les informations enregistrées dans les électrons de notre corps au cours de notre vie humaine sont conservées au delà de notre mort, chaque électron portant à lui seul ce que nous appelons notre esprit, notre "je", et le perpétuant de manière plus durable que nos gènes qui se mélangent, dont l'identité n'est probablement plus guère discernable après quelques siècles. Après notre mort, nos $4 \text{ ou } 5 \cdot 10^{28}$ électrons vont se disperser et entrer dans de nouvelles compositions dans lesquelles ils vont démultiplier notre "je" qui est "leur" esprit aussi bien que le nôtre, et où ils continueront à enrichir leur capital d'information, leur "conscience", en n'oubliant jamais le contenu informationnel acquis dans ces participations successives.

C'est en fait davantage le "je" de l'électron que notre "je", qui ne contribue que par une seule existence parmi les très nombreuses existences vécues par l'électron au cours de ses multiples participations à des structures diverses au cours des âges. L'électron pensant, que Charon nomme "éon" a vécu des milliards d'années dans les étoiles, puis a connu les débuts de notre planète, la naissance de la vie, s'est intégré à de multiples "véhicules", dont l'homme croit être le plus élaboré, et dont il a mémorisé les expériences. Plus le temps passe, plus l'esprit se développe dans le monde de l'électron, au détriment de la matière, le contenu informationnel croissant permettant de faire naître des structures de plus en plus complexes accroissant encore le rythme d'acquisition et la qualité des informations, vers on ne sait quel point oméga.

- C'est effectivement une science-fiction qui plane au-dessus de la S.F. habituelle, mais finalement, c'est aussi une autre forme de pari sur l'éternité, dit Robin, et tout ce laborieux montage n'est-il pas construit uniquement dans cette perspective ?

- C'est une sorte de néo-Teilhardisme scientifique que Charon a développé dans les années 70 et 80. On doit certes reconnaître que le spectacle de cette progression vers un "Point Omega" nous est donné depuis le début du monde, l'accouplement des particules les plus élémentaires depuis le Big-Bang pour former les atomes, puis les molécules de plus en plus complexes, les précurseurs de vie, puis le développement de cette vie, du végétal et du virus à l'homme, montrent à l'évidence cette capacité d'organisation spontanée à partir de l'uniformité primitive. L'espace de l'électron serait responsable, ou à tout le moins agent, de cette progression de néguentropie qui doit plaire à Noël et qui ressemble à la progression de néguentropie du vivant dans ce qu'on peut appeler l'espace du vivant, l'espace enfermé dans la membrane d'une cellule vivante qui se nourrit de substance inerte condamnée à la fêrue de l'entropie croissante, pour en faire de la substance vivante où l'ordre se maintient ou se développe vers des structures de plus en plus ordonnées, complexes, néguentropiques et intelligentes. Il semble qu'au cours du temps, l'évolution s'effectue de plus en plus au profit de la vie et de l'esprit, au détriment de la matière inerte.

- Il y a quand même beaucoup de points obscurs pour moi, dit Noël, je peux à la rigueur concevoir que l'électron réfléchisse par ces échanges internes de spin qui se font sans dépense d'énergie, mais dans le processus d'information externe, vous avez considéré arbitrairement comme système isolé cet électron particulier et le reste du monde, pourquoi un changement de spin quelque part dans le monde affecterait-il cet électron particulier et pas un autre?, si c'est celui-là qui enregistre l'événement en changeant son spin en sens inverse, ce ne sera pas un autre, et donc beaucoup d'autres électrons manqueront cette information. Par ailleurs, pour faire évoluer le monde environnant, il faut bien agir sur lui, et comment l'électron peut-il agir sur le milieu ? Toute action implique déplacement et consommation d'énergie, or l'électron ne peut pas puiser sur l'énergie de son rayonnement interne, sinon sa masse diminuerait, ce qui serait contraire aux lois de la physique, cela se saurait.

- Selon Charon, l'électron doit pouvoir utiliser dans le milieu extérieur des photons "noirs", c'est-à-dire dont le rayonnement couvre tout le spectre des directions et des énergies. Il lui suffit alors pour agir, de choisir parmi ses propres photons celui qu'il veut échanger virtuellement avec ce milieu pour se déplacer dans la direction et avec la vitesse qu'il souhaite. De la même manière, il pourra "piloter" des photons extérieurs. Le problème revient donc à disposer de photons noirs adéquats autour de l'électron ; pour cela, il faut créer dans l'espace environnant une température suffisante.

Si on prend l'exemple de la vie, pour parvenir à créer cet environnement de photons suffisamment chauds, l'électron constitue une "membrane spatiale" par modification de la topologie de l'espace pour en faire une topologie "non plane", où les "droites" se referment sur elles-mêmes, donc où les photons, qui se propagent "en ligne droite" ne se dispersent plus à l'infini comme dans une topologie plane, mais restent confinés dans un espace restreint, retenant la chaleur et la lumière. Une telle modification de topologie n'exige pas d'énergie si on reste en géométrie euclidienne, comme dans les topologies cylindriques, où une droite dessinée sur une feuille plane enroulée en cylindre devient un cercle si elle est perpendiculaire à l'axe du cylindre, ou une spirale si elle ne l'est pas.

De telles "membranes spatiales", délimitant un espace à topologie cylindrique existent, ce sont les corps capables de faire tourner le plan de polarisation de la lumière, par exemple les carbones asymétriques, que leur dissymétrie moléculaire présente sous deux formes symétriques dans un miroir, dont l'une fait tourner le plan de polarisation des photons qui la traversent à droite, et l'autre à gauche. Or on constate que tous les êtres vivants sont constitués de carbones asymétriques d'un seul type. On les trouve dans les acides aminés de la cellule vivante constituant les très longues chaînes carbonées des protéines justement enroulées en hélice à pas très serré qui constituent le premier maillon du vivant, le premier matériau dont les électrons intelligents se servent pour construire une "machine d'évolution".

A l'abri de cet espace à topologie non plane, l'électron pensant, peut piloter des photons pour y faire monter la température et acquérir ce niveau de rayonnement de corps noir suffisant pour son alimentation en énergie, lui permettant de construire ces véhicules d'accroissement de négentropie que sont les diverses "machines d'évolution" mises au point au cours des âges, qui constituent la stupéfiante diversité de la nature.

- Ouais, laisse tomber Robin d'un air blasé, cette S.F. est vraiment ardue et tordue. Si cette théorie a été développée dans les années 70, je m'étonne qu'elle ne soit pas plus connue, il faudrait avoir l'avis de physiciens de haut niveau pour mieux juger de sa solidité. Le côté plaisant que je lui trouve est qu'elle remet l'homme à une place plus raisonnable dans l'univers, en le voyant comme une "machine d'évolution" parmi d'autres sur la planète Terre, et sûrement beaucoup d'autres que nous ignorons sur les milliards d'autres planètes de l'univers.

L'univers, dont la disproportion à l'homme est si choquante, n'aurait plus été créé pour l'homme, ce sont ces éons qui détiendraient l'Esprit dans le monde et le feraient progresser, l'apport de l'homme n'étant qu'une participation momentanée à cette progression de l'Esprit dans l'univers. Voilà donc où se situerait ce monde des idées pour ce néo-platonicien que semble être Charon, ça devrait te plaire, Noël, toi qui me parais aussi chercher les traces de Platon.

- Ouais, l'imita Noël, cette idée de localisation de l'esprit dans nos électrons est superbement originale et surclasse en effet toute la science-fiction, et après tout, si on avait dit à un homme du dix-neuvième siècle que son plan de fabrication était présent dans 100.000 milliards de parties infinitésimales de son corps qu'on appelle maintenant des cellules, sous forme d'arrangements de molécules d'ADN, et qu'on pourrait le reconstituer à l'identique à partir d'une seule de ces cellules mise en couveuse, il aurait certainement été aussi incrédule que nous le sommes aujourd'hui à l'idée que notre esprit ne serait pas cette émergence indéfinissable apparaissant à partir d'un certain degré de complexité de la matière de notre cerveau, mais serait présent dans les 10^{28} à 10^{30} électrons de notre corps, comme notre plan de construction l'est dans toutes nos cellules.

En fait, je trouve surtout que l'imagination des hommes est sans limites, ce qui est un des meilleurs aspects du fonctionnement de l'esprit, mais si un scénario aussi époustouflant peut être considéré comme plausible, il ne me semble par contre pas prouvable. Tu aurais pu dire, mon cher Robin, que cette théorie est bâtie sur le même mode que les religions, elle propose une "modélisation élargie" dont notre perception physique du monde ne constitue qu'un fragment. C'est un modèle apparemment cohérent globalement, mais dont la validité de la partie complémentaire extérieure à notre monde physique ne peut être assurée par aucune expérience réalisable dans ce monde physique.

Pour des physiciens, l'électron reste ce qu'on connaît de lui aujourd'hui, pour Charon, il fait partie d'un monde élargi plausible, mais si Charon considère comme une preuve de validité de sa théorie spiritualiste des éons l'évolution vers la complexité qui est certes évidente, il doit reconnaître que cette même évolution est aussi compatible avec bien d'autres modèles, dont le modèle matérialiste de hasard et de nécessité de Jacques Monod.

Malgré ma tendance platonicienne que vous vous plaisez à souligner exagérément, une telle théorie me laisse méfiant. Il faudra certainement encore beaucoup de travail pour aboutir à quelque chose de plus convaincant. Cela me fait penser à ma petite sœur qui avait reçu à un des derniers Noël un ordinateur pour enfants contenant une encyclopédie élémentaire, l'ordinateur posait des questions de connaissance auxquelles il fallait répondre par oui ou non ; si la réponse n'était pas la bonne, une voix métallique de robot clamait : "cherche encore". Eh bien ! je crois que nos réponses actuelles ne sont pas toutes bonnes et qu'il faut chercher encore et encore. Il ne faut pas céder à la tentation de tout vouloir comprendre et expliquer avant de mourir, il y a encore du travail pour des générations.

- Moi qui croyais penser avec mon cerveau, sans trop savoir comment, mais sans que cela me dérange trop pour vivre, vous m'avez saoulée et fatiguée avec ce panorama étrange d'électrons pensants, avoua Grisella, et je ressens comme un besoin de baisser d'un niveau et de retrouver à la maison nos préoccupations quotidiennes plus terre à terre, mais plus pressantes, du réchauffement climatique et des gaz à effet de serre, des économies d'énergie, de la disparition du pétrole et du gaz et même du charbon et de trouver comment s'en passer avant même qu'ils ne disparaissent puisqu'ils font des misères au climat, comment aller vers une écologie intelligente sans dérailler dans les choix de quelles énergies renouvelables, quels moyens de transport, quelle énergie nucléaire maintenant et dans 50 ans, en se projetant sur l'avenir que nous allons construire, Robin et Noël, il y a du travail pour vous les ingénieurs.

- Je ne serai pas mécontent de changer de registre moi non plus, et je crois deviner que ton envie de retrouver la maison fait l'unanimité. Je décrète donc la sieste terminée, clama Robin en reprenant son rôle de manager des randonnées. Abandonnons les sommets pour la vallée.

Ramassant leurs sacs, ils reprirent le chemin de la descente de l'Obiou pour retrouver sa face nord, beaucoup moins sombre que le matin, l'éclairage rasant du soleil qui avait tourné entre temps commençant à illuminer les quelques pics émergents des pierriers et frappant la muraille ouest qui les dominait.

Comme à l'habitude, ils dévalèrent les grands pierriers en courant sur les talons, cherchant les coulées les plus rapides, et se retrouvèrent au col, dans le domaine de l'herbe qu'ils n'allaient plus quitter d'ici longtemps....

... Après une très longue marche en terrain facile, ils franchirent la crête de Toussière d'où ils aperçurent leur village de Lus ; ils avaient maintenant hâte de retrouver la maison, la famille délaissée pendant ces trois jours, un confort plus douillet que le sac de couchage et des repas plus gastronomiques qu'aux étapes un peu spartiates.

La dernière descente dans la rocaille où la lavande embaumait, puis la traversée de la forêt se firent à un rythme accéléré malgré la lourdeur des jambes. Deux heures plus tard, ils franchirent le portail de la propriété; les chères vestales, qui lisaient sur la terrasse en cette belle fin d'après-midi paisible, quittèrent joyeusement leurs chaises-longues pour les accueillir.

- Pas trop fatigués après ce périple ? Vous devez être assoiffés par cette chaleur !

- Soif ! soif !, répondirent-ils en chœur, et ils se jetèrent sur les verres de Coca-Cola, de sirops ou simplement d'eau fraîche qu'on leur remplissait avant qu'ils aient eu le temps de s'asseoir.

- Tu sais que ton petit frère a beaucoup regretté de ne pas être allé grimper avec vous, son entorse semble bien remise et il ne tient pas en place. J'ai voulu qu'il profite de son repos forcé pour lire un peu, et je lui ai donné un Giono pour essayer de le convaincre que le bonheur de l'homme est dans les petites vallées, mais je ne suis pas certaine d'avoir réussi car je l'ai trouvé à nouveau plongé dans ses éternels romans de science-fiction.

Et vous, avez-vous vu de belles choses, qu'avez-vous fait, en dehors de marcher et marcher encore ?

- Nous avons essayé un superbe orage, expliqua Grisella, après avoir commencé par une première nuit superbement étoilée sur le chemin du Ferrand, qui nous a entraînés dans une espèce d'enquête-séminaire d'été sur l'univers que l'on avait sous les yeux, en retournant à la physique fondamentale avec le professeur Kirgard qui nous a gratifié d'un cours particulier aux escales, et on a bien sûr philosophé tout le long des chemins, ce qui m'a personnellement convaincu que la science-fiction est du pipi de chat à côté de la science tout court, tu aurais dû venir avec nous, les femmes auraient été moins minoritaires dans ce cénacle.

Robin compléta d'un ton moqueur :

- Lorsqu'on n'usait pas nos semelles sur les cailloux des pierriers, on méditait sur les incertitudes de la physique, sur la vie, la mort, la religion, l'esprit, sur la nature profonde des cailloux du chemin, et même en dernier sur des idées dingues concernant la psyché de ces cailloux.

- Tiens, quelle coïncidence! , moi aussi, j'étais justement en train de lire un essai physico-poético-philosophique sur les cailloux et la physique⁷³, qui me plaît beaucoup. Pendant que vous vous rafraîchissez, je ne résiste pas au plaisir de vous en lire quelques passages, comme apport complémentaire de la minorité féminine à vos débats puisque l'auteur en est une femme:

« Je suis une pierre... une grappe d'atomes qui se sont accrochés les uns aux autres une fois pour toutes, et qui n'ont pas l'intention de bouger. Ils sont satisfaits de leur sort. Ils n'éprouvent pas la convoitise de changer de voisinage, contrairement aux liquides qui glissent et essaient sans cesse de nouveaux arrangements, ou aux gaz encore plus volatils, qui battent carrément la campagne... Chacun son tempérament. Moi, c'est minéral. Ce qui veut dire : structure régulière d'atomes contents du voisinage, arrangés de proche en proche, constants dans leur affection ... je suis tellement bien rangée que l'espace entre les atomes devient plus important que les atomes eux-mêmes... Ce qui semble plein, c'est mon réseau bien dense parce qu'il est ordonné, mais en fait, c'est du vide. Un réseau n'est pas plein, c'est une distribution de places...

Pour nous, les pierres, l'apparence n'a pas tellement d'importance, nous passons inaperçues. C'est pourquoi je ne m'intéresse pas à ma forme extérieure... Pas de peau chez nous... l'extérieur ressemble à l'intérieur comme un atome à un atome. Ici ou là, c'est pareil, ma structure se répète, et sans battre, s'il vous plaît, sans vibrer, sans se tordre comme les animaux flasques qui agitent à l'intérieur de leur sac tout un jardin sous-marin de choses gluantes et vagues, qui fermentent et qui palpitent. Pas de ces affaires là chez moi. La vie n'est pas passée chez moi.

C'est tant mieux, si je considère autour de moi les petits personnages qui sortent les uns des autres, qui gonflent brusquement et sans le moindre avertissement explosent avec des sifflements de bouilloire, tandis que d'autres petits sacs, les yeux brillants, attendent de se régaler ...Vues de loin, de l'intérieur des pierres, les simagrées des vivants ne sont pas

⁷³ Anne Sauvagnargues *Je suis une pierre*, dans *La Nature* Desclée de Brouwer 1999.

dérangeantes, pas vraiment agaçantes, ou alors seulement un peu irritantes, comme un vacarme qui n'en vaut pas la peine... Les marches, les pousses, les cris, les odeurs, toute la signalétique des vivants et leurs péripéties, sont d'une terrible monotonie...

Les hommes continuent à nous mépriser en nous foulant au pied, comme ils méprisent rêveusement les plantes et les animaux qu'ils cultivent, qu'ils font cuire et mastiquent avec des délicatesses de propriétaires... Animaux, nos enfants, progéniture maussade... la vie a coulé dans les pierres... nous ne vous avons pas attendus pour déplier des féeries de cristal... nous nous mélangions comme des pâtes visqueuses et nous supportions la certitude joyeuse que notre état n'était que momentané... je sais parfaitement quel avantage cela représente d'avoir envie de l'existence momentanée, de cette montée en température qui procure ivresse et métamorphose... les bulles visqueuses des premières molécules organiques se sont mises à faire les unes dans les autres... c'est cela l'invention, le grand mystère dont la vie est si fière : la multiplication... Sous la cloche de verre du cosmos, la nature fermente comme une panse... tout ce qui est né d'un autre doit admettre qu'il disparaîtra...

Les humains s'imaginent qu'ils sont les premiers à penser, ils en tressaillent de solitude... la sève collective du langage, les idées... se logent dans l'œuf des mots, et ... se nourrissent du vocabulaire qui les loge... les hommes ont inventé la nature en déployant entre eux et les choses la ressource des mots. Ils sont plus denses et stables que les idées, ils font du bruit, on les voit lorsqu'ils sont tracés sur les murs, on les voit s'enchaîner dans les livres... c'est grâce aux mots que les idées s'évadent des cerveaux... alors, bien condensées par le vocabulaire, articulées par la grammaire, les idées habillées dans la langue... s'établissent dans l'armure logique... rien de mieux qu'un nom pour attraper une chose, surtout si on ne sait pas exactement où les choses s'arrêtent, ni si elles ont vraiment des bordures... les mots sont des sortes de petites cages portatives dans lesquelles les hommes serrent les émotions, les saveurs, les qualités du monde et le nom des êtres comme une collection d'insectes...

Si la pensée humaine y met assez de persévérance, elle retrouvera des fragments de code, balbutiera l'ordre divin, la grammaire inventée par Dieu : c'est la science... tout est moulé en nombres... La rage de découvrir comment ça marche fait arracher les peaux pour mettre à nu sous les tentures animales les petites dents des rouages mécaniques et sous eux encore les lignes en pointillé des forces géométriques... la physique n'est plus l'enquête sur la nature, mais une saisie intellectuelle de la matière... »

- Voilà une belle clôture littéraire de notre randonnée-séminaire, je trouve qu'on devrait terminer certains cours de fac par des passages de ce style pour stimuler la partie poétique de nos neurones de l'hémisphère droit et faire rêver un peu, opina Grisella qui sirotait sa grenadine préférée sur glaçons pendant que les garçons déchargeaient leurs sacs.

Mais je dois dire hélas que malgré notre déchaînement de neurones pour tenter d'éclairer la manière dont l'univers a été commis, notre enquête n'a pas permis de conclure s'il est agi d'un accident ou d'un acte délibéré, mais on s'en doutait un peu, "l'univers est comme un coffre fort à combinaison, dont la combinaison est enfermée à l'intérieur"⁷⁴.

- A ces déclarations sentencieuses, moi je préfère la légèreté d'un Woody Allen, dit Robin, "Can we actually "know" the universe? My God, it's hard enough finding your way around in Chinatown"⁷⁵.

- Je crois moi aussi qu'on a un peu surestimé les capacités de nos cerveaux limités par notre rationalisme, mais nous n'avons pas mieux ! C'est aux jurés de se faire une opinion,

⁷⁴ Peter de Vries *let me count the ways* 1965 dans *Science Says* W.H.Freeman New-York 2001

⁷⁵ Woody Allen *Getting Even* 1971 dans *Science Says* W.H.Freeman New-York 2001

comme dans tous les grands procès incertains, dit Noël, mais ce marathon physico-cérébral n'a peut-être pas été inutile, il nous a au moins montré que la vraie science est moins ennuyeuse que la science-fiction.

Un braillement sonore retentit dans l'escalier, c'était le petit frère de Noël qui dévalait de sa chambre en exultant :

- Quelle chance vous avez de rentrer cet après-midi, vous savez quoi ? Il y a du cinéma ce soir à la salle des fêtes et devinez ce qui est au programme ? De la science-fiction avec Star Trek, La menace !
- Bof ! lâchèrent-ils d'une seule voix.

TABLE DES CHAPITRES

		<i>Pages</i>
1	UNIVERS	8
2	TEMPS	20
3	ESPACE	34
4	MATIÈRE	44
5	QUANTA	58
6	FORCES	72
7	COMPRENDRE	84
8	ASTROPHYSIQUE	102
9	BEAUTÉ	112
10	ENTROPIE	120
11	ESPRIT	130

BIBLIOGRAPHIE

- Académie des sciences Actes du colloque 1992 pour le centenaire de la naissance de Louis de Broglie, *La découverte des ondes de matière*, Lavoisier 1994.
- Allègre Jean *La défaite de Platon* Fayard 1995
- Arnould Jacques (+Vincent) *La dispute sur le vivant* Desclée de Brouwer 2000
- Atkins Peter W., *Comment créer le monde*, Seuil 1993.
- Audouze Jean, Cassé Michel, Carrière Jean-Claude, *Conversations sur l'invisible*, Plon 1996.
- Balian Roger, *Le temps macroscopique-Le temps et sa flèche* Flammarion 1996
- Barberousse Anouk ((+Kisler+Ludwig) *La philosophie des sciences au XX^e siècle* Flammarion 2000
- Barrow John D., *La grande théorie*, Flammarion 1996.
- Baton Jean-pierre, Cohen-Tannodji Gilles, *L'horizon des particules*, Gallimard 1997.
- Biezunski Michel, *Histoire de la physique moderne*, La découverte 1996.
- Bitbol Michel, *L'aveuglante proximité du réel*, Flammarion 1998.
- Broglie Louis de (Nobel), *Continu et discontinu en physique moderne*, Albin Michel 1941.
- Broglie Louis de (Nobel), *Nouvelles perspectives en microphysique*, Flammarion 1992.
- Capra Fritjof, *Le Tao de la physique*, Sand 1992.
- Caratini Roger *Panorama encyclopédique des sciences* Belin 1993
- Cassé Michel, *Du vide et de la création*, Odile Jacob 1993.
- Charon Jean E., *L'esprit, cet inconnu*, Albin Michel 1977.
- Charon Jean E., *Sur la barque du temps*, Albin Michel 1989
- Charon Jean E., *Le monde éternel des éons*, Le Rocher 1987
- Charon Jean E., *Théorie Unitaire*, Albin Michel 1974
- Charon Jean E., *L'esprit et la science, colloque de Fes*, Albin Michel 1984
- Charon Jean E., *Imaginaire et réalité, colloque de Washington*, Albin Michel 1984
- Cohen-Tannoudji Gilles, *Les constantes universelles*, Hachette 1998.
- Costa de Beauregard Olivier de, *Le temps déployé*, Le Rocher 1988.
- D'Espagnat Bernard, *A la recherche du réel*, Gauthier-Villars 1991.
- Damisch Hubert, *Le jugement de Pâris*, Flammarion 1997.
- Davies Paul, *L'esprit de Dieu*, Hachette 1998.
- Delumeau Jean, *Le savant et la foi*, Flammarion 1991.
- Diu Bernard, *Les atomes existent-ils vraiment ?*, Odile Jacob 1997.
- Eco Umberto, *Kant et l'ornithorynque*, Grasset 1999.
- Gell-Mann Murray (Nobel), *Le quark et le jaguar*, Flammarion 1996.
- Gennes Pierre-Gilles de (Nobel), Badoz Jacques, *Les objets fragiles*, Plon 1994.
- Glashow Sheldon L., *Le charme de la physique*, Albin Michel 1997.
- Gribbin John, *A la poursuite du Big Bang*, Flammarion 1992.
- Gribbin John, *Le chat de Schrödinger*, Flammarion 1994.
- Hawking Stephen, *Commencement du temps et fin de la physique*, Flammarion 1994.
- Hawking Stephen, *Trous noirs et bébés univers*, Odile Jacob 1993.
- Hawking Stephen, *Une brève histoire du temps*, Flammarion 1993.
- Hawking Stephen, *L'univers dans une coquille de noix* Odile Jacob 2001
- Heidmann Jean(+Vidal-Madjar, Prantzos, Reeves), *Sommes-nous seuls dans l'univers* Fayard 2000
- Jacob Maurice, *Au cœur de la matière*, Odile Jacob 2001.
- Kisler (+Barberousse+Ludwig) *La philosophie des sciences au XX^e siècle* Flammarion 2000
- Klein Etienne, *La physique quantique*, Flammarion 1996.
- Klein Etienne, Spiro Michel, *Le temps et sa flèche*, Flammarion 1996.
- Kourouma Ahmadou *Allah n'est pas obligé* Seuil 2000

Lancel Serge, *Saint Augustin*, Le grand livre du mois, Fayard 1999.

Lao Tseu, *Tao Te King* Librairie d'Amérique et d'Orient traduction Duyvendak 1981

Lederman Léon (Nobel), *Une sacrée particule*, Odile Jacob 1996.

Lochak Georges, *La géométrisation de la physique*, Flammarion 1996.

Ludwig Pascal (+Barberousse+Kisler) *La philosophie des sciences au XX^e siècle* Flammarion 2000

Matricon Jean, Waysand Georges, *La guerre du froid*, Seuil 1994.

Mavridès Stamatia, *La relativité*, PUF 1990.

Naslin Pierre, *Du Big Bang à l'homme*, SIRPE 1995.

Naslin Pierre, *La complexité*, SIRPE 1997.

Naslin Pierre, *Les trois masques de la connaissance*, SIRPE 1991.

Ormesson Jean d', *Presque rien sur presque tout*, Gallimard 1995.

Ortoli Sven, Pharabod Jean-Pierre, *Le cantique des quantiques*, La Découverte 1998.

Paul Jacques, *L'homme qui courait après son étoile*, Odile Jacob 1998.

Pelt Jean-marie, *Dieu de l'univers*, Fayard 1995.

Petit Jean-Pierre, *On a perdu la moitié de l'univers*, Hachette Puriel 2001

Pharabod Jean-Pierre, Pire Bernard, *Le rêve des physiciens*, Odile Jacob 1993.

Poincaré Henri, *La valeur de la science*, Flammarion 1994.

Prantzos Nicolas(+Heidmann, Reeves, Vidal-Madjar) *Sommes-nous seuls dans l'univers* Fayard 2000

Prigogine Ilya (Nobel), *La fin des certitudes*, Odile Jacob 1996.

Reeves Hubert, *Dernières nouvelles du cosmos*, Seuil 1994.

Reeves Hubert, *L'heure de s'enivrer*, Seuil 1992.

Reeves Hubert(+Heidmann, Prantzos, Vidal-Madjar), *Sommes-nous seuls dans l'univers* Fayard 2000

Revel Jean-François, *Histoire de la philosophie occidentale*, NiL 1994.

Revel Jean-François, *L'œil et la connaissance*, Plon 1999.

Ricard Matthieu, Trinh Xuan Thuan, *L'infini dans la paume de la main*, Fayard 2000

Romilly Jacqueline de, *Pourquoi la Grèce ?* Fallois 1992.

Ruyer Raymond, *La gnose de Princeton*, Fayard 1991.

Sakharov Andreï, *Mémoires*, Seuil 1990.

Sauvagnargues Anne *je suis une pierre*. *La Nature* coll.proches lointains. Desclée de Brouwer 1999

Schwartz Laurent, *Un mathématicien aux prises avec le siècle*, Odile Jacob 1997.

Selleri Franco, *Le grand débat de la physique quantique*, Flammarion 1994

Trinh Xuan Thuan, *Le chaos et l'harmonie*, Fayard 1998.

Trinh Xuan Thuan, Matthieu Ricard, *L'infini dans la paume de la main*, Fayard 2000

Vidal-Madjar Alfred(+Heidmann, prantzos, Reeves), *Sommes-nous seuls dans l'univers* Fayard 2000

Vincent Jean-Didier (+Arnoult) *La dispute sur le vivant* Desclée de Brouwer 2000

Wittgenstein Ludwig *Tractatus logico-philosophicus* CD-ROM Universalis® 1998

