UNIVERSITE DE YAOUNDE I
****
CENTRE DE RECHERCHE ET DE FORMATION DOCTORALE EN SCIENCES HUMAINES, SOCIALES ET EDUCATIVES
****
UNITE DE RECHERCHE ET DE FORMATION DOCTORALE EN SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES
****
DEPARTEMENT DE PHILOSOPHIE

UNIVERSITY OF YAOUNDE I
****
POSTGRADUATE SCHOOL FOR SOCIAL AND EDUCATIONAL SCIENCES
****
DOCTORAL RESEARCH UNIT FOR SOCIAL SCIENCES
****
DEPARTMENT OF PHILOSOPHY

DES ENTROPIES LOCALES À L'ENTROPIE GÉNÉRALE : UNE THÉORISATION DE L'ORDRE COSMIQUE

Thèse de Doctorat en Philosphie soutenue le 30 avril 2025

Spécialisation : Epistémologie et Logique

par

FOE Jospin Brice

BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE UYI

Devant le jury constitué de

Président	NGAH ATEBA Alice Salomé, Pr	UYI
Rapporteur	MOUCHILI NJIMON Issoufou Soulé, Pr	UYI
Membres	MONDOUE Roger, Pr	U.Dschang
	BODO Bertrand, Pr	UYI
	MANGA NOMO Lucien, MC	UYI

NOTE D’AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l’utilisation de ce document.

Par ailleurs, le Centre de Recherche et de Formation Doctorale en Sciences Humaines, Sociales et Educatives de l'Université de Yaoundé I n’entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse ; ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur.

SOMMAIRE

DEDICACE ..... **iii**

REMERCIEMENTS ..... **iv**

GLOSSAIRE……**v**

LISTE DES FIGURES ..... **vii**

RÉSUMÉ ..... **ix**

ABTRACT ..... **x**

INTRODUCTION GÉNÉRALE **1**

PREMIERE PARTIE :LA THERMODYNAMIQUE MODERNE UNE CRITIQUE DE LA VISION CLASSIQUE DE L'ENTROPIE. **13**

CHAPITRE 1 : CRITIQUE D'UNE VISION CLASSIQUE DE L'ENTROPIE **16**

CHAPITRE 2 : LA PRODUCTION D'ENTROPIE DANS LES SYSTEMES ISOLÉS **48**

CHAPITRE 3 : AU-DELÀ DES SYSTÈMES ISOLÉS **79**

DEUXIÈME PARTIE : APORIES DE L'APPROCHE THEORIQUE D'UNE ENTROPIEU UNIVERSELLE CROISSANTE **112**

CHAPITRE 4 : DIFFICULTÉS THÉORIQUES DE LA FORMULATION D'UNE ENTROPIE UNIVERSELLE **114**

CHAPITRE 5 : OBSTACLES MÉTHODOLOGIQUES DE LA VÉRIFICATION D'UNE ENTROPIE GÉNÉRALE **148**

CHAPITRE 6 : LES SITUATIONS FLOUES DU MODÈLE STANDARD **180**

TROISIEME PARTIE DE LA RUPTURE EPISTEMOLOGIQUE À LA CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PARADIGME ENTROPIQUE **211**

CHAPITRE 7 : LA DÉCROISSANCE RETROUVÉE OU RÉECRITURE DU NOUVEAU MODÈLE. **213**

CHAPITRE 8 : ENJEUX PRATIQUES ET INTERETS HUMANITAIRES DES QUESTIONS LIÉES À L'ENTROPIE **240**

CHAPITRE 9 : COMPRENDRE LA VIE À PARTIR DE LA PHYSIQUE **269**

CONCLUSION GÉNÉRALE **301**

BIBLIOGRAPHIE **305**

TABLE DES MATIÈRES……315

A

MES PARENTS,

BELINGA MBARGA ANDRÉ ET ABOMO ADA JULIENNE

REMERCIEMENTS

Je remercie mon Directeur de thèse, le Professeur MOUCHILI NJIMOM Issoufou Soulé pour toute la peine qu'il s'est donnée pour me conduire vers les cimes de la recherche dont ce travail en est un appendice.

Je remercie toutes les autorités académiques, directes et indirectes, qui ont rendu possible la production de ce document grâce leur travail : Monsieur le Recteur de l'Université de Yaoundé I, Madame le Doyen de la Faculté des Arts, Lettres et sciences Humaines, Monsieur de chef de Département de Philosophie.

Je remercie mon camarade NKASNA Serge Daddy, un camarade que je considère comme un frère et qui constitue pour moi un objet de ressourcement intellectuel grâce à nos échanges et diverses motivations venant de lui.

Je remercie toutes les personnes qui m'ont encouragé et soutenu tant matériellement que psychologiquement pour mener à bien ce travail, au rang desquelles : EZA NGONO Odile Solange.

Je remercie également ASTRIDE SOSSENO MVOTO pour son soutien, ses encouragements multiformes et ses émulations qui n'ont pas cessé de me booster le mental, sans oublier sa disponibilité dans la relecture du présent document

GLOSSAIRE

Entropie : Il vient du grec ἐντρπιά (trope) qui signifie transformation et essayant d'imiter en même temps le son *énergie*, cl'entropie constitue une notion de thermodynamique qui sert à mesurer le taux de désordre d'un système. Le terme fut créé par Rudolf Clausius en 1850.

Néguentropie : C'est le contraire de l'entropie. Si l'entropie en thermodynamique classique fut toujours considérée comme unhe fonction essentiellement croissante, la thermodynamique moderne admet, dépuis Erwin Schrôdinger, une évolution entropique négative, appelée en anglais negative entropie. D'où est tiré le terme néguentropie.

Enthalpie : se définit du point de vue des calculs comme une fonction qui synthétise en une seule fonction l'énergie totale d'un système thermodynamique. Tout comme l'entropie, l'enthalpie est une fonction d'état, c'est-à-dire qu'elle ne tient compte de l'état initial et de l'état final. Elle peut encore se définir plus simplement comme la quantité de chaleur qu'un système doit absorber ou libérer pour se mettre en isothermie avec son environnement.

Système thermodynamique : C'est tpute portion de l'univers délimitée par des frontières réelles ou imaginaires.

Thermodynamique : partie de la physique qui étudie les différentes transformations de la chaleur en travail et les transformations d'énergie dans un système.

Micro-états : ensemble des états microscomiques par où passe un système thermodynamique. C'est générallement un nombre exponentiel égal au logaritme du nombre de ses particules élementaires, tel que **S= logω.Kb.**

Macro-état : c'est l'état macroscopique d'un sysqtème thermodynamique. Il se caratérise par des variables macroscopiques intensives telles que la pression et la température.

Ensembles grand-canoniques : étudiées par Josiah Willard Gibbs. Ces ensembles sont des répliques fictives des ensembles réels, réalisées par couplages entre un ensemble fini caractérisés par un volume V fixé, un nombre de molécules N également fixé et une énergie E, avec un grand ensemble dont on suppose l'Energie E, le nombre de particules N et le volume V infinis. Le grand système est considéré comme un réservoir d'énergie, de particules ou de volume

tel que, quel que soit les échanges de particules, et d'énergie avec le petit système, l'énergie du grand système reste stable, ainsi que son nombre de particules.

Ensembles canoniques : étudiées par Josiah Willard Gibbs. Ces ensembles sont des répliques fictives des ensembles réels, réalisées par couplages entre un ensemble fini caractérisés par un volume *V* fixé, un nombre de molécules *N* également fixé et une énergie *E*, avec un grand ensemble dont on suppose l'Energie *E*, le nombre de particules *N* et le volume *V* infinis. Le grand système est considéré comme un réservoir d'énergie, de particules ou de volume tel que, les deux systèmes effectuent uniquement des échanges de chaleur et non pas de particules. Quels que soient les échanges de particules, la température du grand système reste stable.

Energie noire : énergie de nature inconnue qui pousse ll'univers en expansion. L'énergie noire, la matière noire et la matière baryonique sont les trois entités qui constituent la masse de l'univers observable à des proportions différentes. Elle représente 68,3 % de la matière totale de l'univers. Elle l'emporte sur la gravité.

Matière noire : la matière noire demeure une énigme. Avec l'énergie sombre et la matière baryonique, elle constitue les trois entités qui constituent la masse de l'univers observable à des proportions différentes. Elle représente 26,8 % de la matière totale de l'univers.

Matière baryonique : matière à l'état atomique. Elle constitue une des entités qui forment l'univers observable. Son taux est 4,9 %.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Une partie du moteur de la machine à vapeur de James watt proposée en 1774 publiée par Mitrovic 57

Figure 2 : Version quantique du théorème H de Boltzmann 59

Figure 3 : Illustration de deux situations possibles d'un système, d'une chaotique et l'autre ordonnée 67

Figure 4 : illustration le transfert thermique du système Ω1 au système Ω2. 84

Figure 5 : illustration d'une différence entre un système à l'équilibre présentant un maximum entropique et un système loin de l'équilibre présentant un minimum entropique générant une structure complexe. 87

Figure 6 : Illustration de l'interactionnelle gravitationnelle entre deux grands systèmes. Les systèmes sont supposés isolés mais la loi de de la gravitation de Newton reste valable pour les deux grands systèmes 94

Figure 7 : illustration du cycle d'utilisation de l'énergie par la cellule en tension entre néguentropie et entropie pour le maintien de son organisation. 100

Figure 8 : Illustration montrant que les corrélations de particules en physique sont en fait des liaisons en chimie. 104

Figure 9 : Description du comportement des particules sur les parois d'une enceinte illustrant un travail de pression sur les bords extérieurs de l'enceinte. 125

Figure 10 : Illustration d'un système ouvert avec deux phases différentes constituées de l'eau à température ambiante et un morceau de glace. 127

Figure 11 : Illustration de la disposition des molecules selon les etats de la matière 128

Figure 12 : Répartition de la densité d'énergie de l'univers après exploitation des premières données du satellite Planck. L'énergie noire et la matière noires en sont des composantes principales. 132

Figure 13 : Illustration de la conception de notion d'univers comme union du système et de son environnement proche (tirée de BELAID Taous, in Cours et exercices de thermodynamique) 157

Figure 14 :Illustration de l'évolution de l'univers où la décroissance entropique est opposée à l'augmentation du flux d'information (tiré du modèle mathématique de Tom Stonier 167

Figfure 15: Courbe du comportement de l'entropie par rapport à la dérivatiion de la température tirée de l'article Yi-Fang Chang intitulé entropy decrease in isolated systems : Theory, Facts and tests. 168

Figure 16 : illustration de la diminution de l'entropie due à la chute de température survenue avec l'augmentation du volume. 172

Figure 17 : illustration représentant le gonflement de l'univers depuis le big bang et permettant retracer son histoire. 190

Figure 18 repésentant les échanges entre le grand système (l'univers) et un petit système (une étoile) formant un ensemble grand-canonique 198

Figure 19 : illustration de la courbure de l'espace-temps en fonction de la densité de la matière montrant que l'univers n'est pas isotrope, mais courbé en fonction de la densité de matière .. 204

..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 20 : Illustration comment l'énergie émise par le soleil n'est initialement de la chaleur mais un aliment pour la végétation. Mais ce rôle est détourné par le ravage écologique. 245

Figure 21 : illustration l'incrustation de l'éconosphère dans la biosphère. 254

Figure 22: Illustration de la situation qui devrait normalement avoir lieu dans une évolution thermodynamique spontanée entre le corps humain et son environnement. 276

Figure 23 : Illustration de la situation réelle qui se passe dans la thermodynamique du vivant signifiant que l'évolution n'est pas spontanée 276

RÉSUMÉ

La thermodynamique est née de la rupture de la physique avec la dynamique classique qui était une physique déterministe. En effet, la dynamique classique était basée sur l'étude des trajectoires individuelles. Ainsi, les résultats étaient toujours prédictibles. Par contre, la thermodynamique qui prend naissance dans la physique des quanta sera basée sur l'étude des trajectoires d'ensemble de populations de particules va rompre définitivement avec le déterminisme de la dynamique classique, en mettant fin au mythe d'une science des certitudes déterministes par l'introduction du chaos. Au cœur de ce nouveau paradigme physique, qui est la thermodynamique, se trouve un principe architectonique, voire une catégorie fondamentale, à savoir l'entropie. En parlant de cette entropie, le problème qu'elle pose se situe au niveau du sens de son évolution. Un sens qui fait toute la différence. En effet, le sens de l'évolution entropique qui, pour le physicien se perçoit comme un simple problème de calculs physico-mathématiques en ceci que l'entropie est une fonction d'état additive, cette évolution inquiète le philosophe, car ce sens d'évolution induit directement l'existence de l'être. Ainsi, il traduit tantôt la mort, tantôt la vie du système concernée. L'enjeu ici est que, puisque tout pourrait être considéré comme un système thermodynamique, le message de l'entropie cible la nature tout entière en générale et la nature humaine en particulier. De ce point de vue, cette question engendre anxiété et inquiétude existentielles, et de ce fait, elle intéresse le philosophe, car le destin de l'homme et de la nature tout entière est en jeu. La question ne préoccupe donc plus seulement le physicien, mais aussi et surtout le philosophe. A ce niveau, il s'agit de réinterroger les entropies locales et l'entropie universelle et de les mettre en rapport avec l'existence humaine et l'univers tout entier. Il ne s'agit donc pas ici de philosopher simplement pour se comprendre et comprendre le monde, mais surtout pour *sauver sa peau*, car le message de l'entropie pourrait annoncer le pire. Luc Ferry disait : *« on ne philosophe pas pour s'amuser, ni même pour comprendre le monde et se comprendre mieux soi-même, mais parfois pour "sauver sa peau". »*[1]Il s'agira donc d'approfondir les connaissances sur l'entropie afin de découvrir son vrai message, au cas où l'ancien serait erroné et d'adopter, en revanche, un comportement conséquent.

[1]Luc Ferry, *Apprendre à vivre*, Edition Plon, 2006, p.10

ABTRACT

Thermodynamics is born from the break of physics with classical dynamics which was a deterministic physics. As matter of fact, the dynamical physics was based on individual trajectories whose results were predictable. On the other hand, thermodynamics which originates in quantum physics, will be based on trajectories of entire populations of particles, will break with the determinism of classical dynamics by putting an end to the myth of a science of deterministic certainties. At the heart of this new physical paradigm is an architectonic principle or even a fundamental category, namely entropy. Talking about this entropy, the problem it raises is situated at its evolution's direction. A question that creates curiosity and originality. In fact, the entropy's evolution which is regarded by the physicist as a simple matter of physico-mathematical calculuses in that entropy is an additive state's function; this worries the philosopher, because this direction influences the being's existence. Sometimes, it expresses either death or life of the concerned system. The issue here is that, since everything could be considered as a thermodynamical system, the message of entropy targets all nature in general and human nature in particular. All things considered, this issue generates anxiety and existential anguish, and therefore it interests the philosopher, since man's and the whole nature's fate is envolved. The issue is no longer the physicist's one but especially the philosopher's. At this level of thinking, it is about considering back the local entropies and the universal one,so as to put them in relationship with the human existence and the whole universe.It is no longer about philosophizing to know the world and better understand oneselves, but about to doing it to save one's own skin, because the entropy's message could annonce the worst. Luc Ferry was saying : *« we do not philosophize to entertain, neither to understand the world nor to understand ourselves, but to save ourselves, sometimes. »*[2]Hence, it is question to deepen knowledge about entropy and discover its true message, in case it is wrong and adopt endly a becomingly behavior.

[2]Luc Ferry, *Apprendre à vivre*, Edition Plon, 2006, p.10

INTRODUCTION GENERALE

La recherche de la connaissance est la caractéristique fondamentale de l'homme. Cette soif de connaissance, chez les philosophes présocratiques, a été marque par le désir de comprendre le cosmos. Ainsi, deux attitudes font jaillir à l'observation du cosmos, à savoir l'émerveillement par les poètes et la curiosité par les philosophes. Si l'émerveillement des poètes ne va pas au fond des choses pour les découvrir et livrer leur secret voire briser leur mythe, c'est tout le contraire de la curiosité développée par les philosophes. Celle-ci pose le problème de la quiddité des choses, c'est-à-dire qu'ils vont chercher à connaître la signification de chaque chose. Pierre Rousseau, parlant de ces premiers philosophes affirme que *: « ce n'était point l'appât du gain qui les animait, mais la simple curiosité, les poussant à chercher des explications en dehors de toute action des dieux ou d'esprits. Ces premiers philosophes se baptisèrent eux-mêmes des "curieux de la nature", des physiologues »*[3]. Cela dit, au premier moment de la pensée humaine, avant que celle-ci ne porte sur l'homme, et les autres axes non moins significatifs (Dieu, la société, l'économie etc.), la connaissance a d'abord porté sur la nature entendue ici comme le monde et tout ce qui s'y trouve.

Les premiers philosophes sont ainsi qualifiés, à juste titre, de naturalistes ou de cosmologistes au sens premier du mot, à savoir des gens qui étudiaient la nature, le cosmos, l'univers. De ce point de vue, la philosophie de la nature se situe à l'aurore de la pensée philosophique. En reconstituant le film de l'évolution de la pensée humaine, le désir de comprendre le monde remonte au premier moment de l'éveil de la pensée humaine. Ainsi a-t-il été le point de départ de la conscience comme connaissance ou saisie des choses par le sujet pensant, surpassant de mille années-lumière l'émerveillement stérile des poètes et portant l'humanité au seuil de *désenchantement*[4] de la nature.

---

[3]Pierre Rousseau, *Histoire de la science*, Librairie Arthème Fayard, Paris, 1954, p36.

[4] Le désenchantement est une expression courante en épistémologie pour faire allusion à une attitude de démystification du réel par le truchement d'une vision légaliste, déterministe et causale du monde. Une attitude qui se trouve aux antipodes d'une explication religieuse ou enchantée. L'expression *monde désenchanté du monde* a été créée par le sociologue Max Weber dans *L'Ethique protestante et l'esprit du capitalisme,* pour désigner le processus de recul des croyances religieuses et magiques au profit des explications scientifiques.

Ce premier moment de la réflexion cosmologique ne porta pas initialement sur le fonctionnement de la nature, mais davantage sur l'essence commune des choses qui la constituent, leur substance unificatrice, leur quiddité unique. Plusieurs savants représentant des écoles sont intervenus, donnant des réponses aussi divergentes que variées dont les plus connus sont :

- Thalès pour qui l'eau est l'élément commun à toutes les choses qui existent. Pierre Rousseau poursuit : *« Alors que nos chimistes modernes distinguent dans la nature quatre-vingt-douze éléments, alors que les alchimistes en comptaient quatre, Thalès supposa qu'il n'en existait qu'un seul, l'eau qui, sous différents aspects, eût rendu compte de la diversité des matières. »*[5]
- Anaximandre pour qui c'est plutôt l'*apeiron*. Selon Pierre Rousseau toujours, *« il abandonna l'eau en tant qu'élément fondamental et la remplaça par l'apeiron, c'est-à-dire quelque chose d'indéterminé, peut-être l'espace. »*[6]
- Anaximène qui fait appel à l'air. Pierre rousseau rapporte : *« un troisième membre de l'école de Milet, nommé Anaximène (…) évinça l'apeiron et proposa l'air. »*[7]

On peut encore citer Héraclite qui proposa le feu ou Pythagore qui pensait que c'est plutôt le nombre. A bien y voir, tous ces philosophes citaient-là des structures macroscopiques encore sécables ou divisibles qui contiennent des entités plus petites. Il fallait donc redescendre plus bas pour rechercher cet élément basique insécable, commun à toute chose. A ce moment, la réflexion va se spécialiser. Certains philosophes vont commencer à soutenir théoriquement l'argument de l'existence d'éléments insécables qui soient à la base de toutes choses. Ils lui donneront le nom d'*atomes*. Parmi ces philosophes, nous pouvons citer Leucippe, Démocrite, Epicure et Lucrèce. C'est Démocrite qui forgea le nom *atomos* qui signifie indivisible en grec, pour théoriser un modèle de compréhension de la matière, à partir de ces entités insécables et très petites. Jean Salem affirme que : *« Démocrite, Epicure et Lucrèce ont enseigné que tout dans l'univers est fait d'atomes et de vide. »*[8]Les atomistes avaient ainsi fait un grand pas dans la tentative de

[5] Pierre Rousseau, *Histoire de la science, Op. Cit.,* p. 39
[6] *Ibidem*
[7] *Ibidem*
[8] Jean Salem, *Démocrite, Epicure, Lucrèce : philosophes des atomes et pensée du plaisir*. (Conférence no 4.) in https://lycee-henri4.com

compréhension de la nature. Ils avaient supposé que l'univers, entendu comme l'ensemble de tout ce qui existe, soit composé de ces petits éléments indivisibles. C'est ainsi qu'Epicure pensait que l'univers était infini à cause de l'infinité du nombre de ces petits éléments de bases (atomes) et que tous les corps seraient la conséquence de l'imbrication de ces petites briques de base. Paul-Bernard Grenetaffirme que, du point de vue d'Epicure, *« les corps composés résultent de la juxtaposition de corps indivisibles (atomes) et immuables (…) L'univers est infini, quant au nombre de corps (atomes) qu'il contient. »*[9]Mais, l'originalité d'Epicure fut de sortir d'une vision atomiste déterministe où les atomes tombaient verticalement en ligne droite. En effet, dans un contexte dominé par une conception déterministe tant du point de vue de la physique, avec le modèle atomique de Démocrite, que du point de vue de la philosophie, avec la doctrine stoïcienne de colorée de fatalisme[10], Epicure, imagina une situation de chaos atomique où les atomes seraient troublés dans leur chute par une inclinaison. Car, comment parviendraient-ils à former des corps s'ils maintenaient ainsi une trajectoire verticale dans leur chute ? Il conçut alors une catégorie arbitraire qu'il appela *clinamen,* définie par lui comme une petite déviation des atomes dans leur chute afin qu'ils puissent s'entrechoquer et ensuite se combiner. Lucrèce qui est un disciple d'Epicure prolongea la vision épicurienne en voyant la nature comme un agencement d'atomes. Il insista beaucoup sur le clinamen, cet écart arbitraire qui permet la combinaison des atomes pour former la nature des choses. Il écrivit un livre dont le titre est très évocateur *: De la nature des choses.* Il y affirmait *:*

> Voici encore, en cette matière, ce que je veux te faire connaître. Les atomes descendent en ligne droite dans le vide, entraînés par leur pesanteur. Mais 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. 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. [...] C'est pourquoi, je le répète, il faut que les atomes s'écartent un peu de la verticale, mais à peine et le moins possible. N'ayons pas l'air de leur prêter des mouvements obliques que démentirait la réalité [...] Qu'un rien dévie en quelque chose de sa ligne, qui serait capable de s'en rendre compte ? Mais si tous les mouvements sont enchaînés dans la nature, si toujours d'un premier naît un second suivant un ordre rigoureux, si par leur clinamen les atomes ne provoquent 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

[9] Paul-Bernard Grenet, *Histoire de la philosophie antique*, Beauchesne et ses Fils, Paris, 1960, p.293
[10] La philosophie fataliste est le versant philosophique du déterminisme scientifique. Il soutient que l'homme n'est pas libre. Son destin est prédéfini et il ne peut y échapper.

> 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 ? [...] Aux atomes aussi nous devons reconnaître cette propriété : eux aussi ont une cause de mouvement autre que les chocs et la pesanteur – une cause d'où vient le pouvoir inné de la volonté, puisque nous voyons que rien ne peut naître de rien [...] : or tel est l'effet d'une légère déviation des atomes, dans des lieux et des temps non déterminés.[11]

Ainsi, dans la physique épicurienne, le *clinamen* est un écart, une déviation (littéralement une *déclinaison*) spontanée des atomes qui permet d'expliquer l'indéterminisme et la liberté qui constituent la réalité de l'existence humaine et des propriétés intrinsèques de la matière. Initialement ces propriétés ne furent pas toujours reconnues comme caractéristiques du réel. Celui-ci a longtemps été enfermé dans les carcans d'un déterminisme implacable, impliquant légalisme et causalité scientifique. Depuis Démocrite, qui pensait que la chute des atomes dans le vide suit une trajectoire verticale sans possibilité de perturbation voire de désordre, en passant par l'aristotélisme qui était une vision basée sur une création divine harmonieuse, à l'image d'un créateur parfait, présentant une cosmologie dont les mouvements des corps célestes sont réguliers, jusqu'aux physiciens modernes, le déterminisme constituait le paradigme d'intelligibilité de la nature physique et de l'univers. En effet, la science classique viendra rompre avec l'aristotélisme qui dominait le Moyen-âge, grâce à la prise de recul par rapport à la vision créationniste du monde et, surtout, son emprise sur le paradigme cosmologique de l'époque. Ceci donna lieu à la grande Révolution conduite par le trio Kepler-Copernic-Galilée, appelée Révolution Copernicienne. Mais, cette science classique souvent aussi qualifiée à juste titre de *science désenchantée*[12] n'affranchit pas totalement la pensée scientifique des carcans fixistes du déterminisme. Au contraire, elle accentua le déterminisme et la causalité. Tout devait s'expliquer désormais à partir des lois physiques. Newton est le chef de file de cette vision légaliste de la science. Il est considéré par Prigogine, dans la *Nouvelle Alliance,* comme étant le nouveau Moïse donnant la table de la loi. Le modèle scientifique, quant à lui, était celui du génie laplacien, capable de connaitre tous les états de l'univers pourvu que lui soient définies les conditions initiales. Pierre-Simon Laplace, parlant de façon métaphorique d'une intelligence humaine forgée dans un déterminisme implacable, à laquelle rien n'échappe, affirmait :

[11]Lucrèce, De *la nature des choses,* livre II, traduction Alfred Ernout, éditions les Belles lettres, Paris, 2012, p. 216.
[12] Selon Ilya Prigogine, dans *La Nouvelle alliance*, le désenchantement est une situation qui caractérise les avancées scientifiques où la raison rend compte du réel par les seules lois physiques. D'où le déterminisme scientifique qui est au cœur du désenchantement. La dynamique classique fut qualifiée par Ilya Prigogine de science désenchantée à cause de son légalisme strict.

> Une intelligence qui, à un moment donné connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus petit atome ; rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux. L'esprit humain offre, dans la perfection qu'il a su donner à l'astronomie, une faible esquisse de cette intelligence[13].

Mais, à bien y voir les choses, l'idée de déterminisme continuait de faire problème, car elle rompait avec l'expérience quotidienne, engendrant ainsi le problème de deux cultures dont parle Charles Snow Percy[14] où chaque culture évolue parallèlement sans tenir compte de l'autre : la culture scientifique et la culture humaine.

En effet, l'expérience quotidienne de l'existence donne lieu d'observer la liberté, la nouveauté, la créativité et même l'aléatoire que n'intègrent pas le déterminisme. Le problème des deux cultures se résume au fait que la science était enfermée dans sa tour d'ivoire avec ses suffisances et ses fiertés, racontant une histoire qui n'a pas lieu dans la réalité, mais qui tient dans sa formulation théorique. Il fallait donc réconcilier la science avec la philosophie ou simplement avec l'existence humaine qui nous offre un spectacle qui ne correspond pas avec celui d'une science fière d'elle-même et prétentieuse de pouvoir tout expliquer à partir des lois simples.

L'indéterminisme devint une question sérieuse qu'il fallait désormais prendre, non comme une exception à la règle déterministe déjà établie, mais comme la règle même qui régit le comportement de la nature. D'où une autre révolution copernicienne en science qui va à son tour rompre avec la *science désenchantée* pour une *science réenchantée*, c'est-à-dire une science qui réintroduit sous une forme subtile certaines propriétés qui coïncident avec la réalité sans mettre la loi de côté. Ainsi va-t-on découvrir le chaos et ses corollaires tels l'imprédictibilité, l'indéterminisme etc. Cela exige de la part des hommes de sciences qu'ils la refondent, non plus à partir des trajectoires individuelles des objets physiques qui aboutissent très souvent à des résultats déterministes dans la plupart des cas, mais de la fonder sur les trajectoires d'ensembles

[13] Pierre-Simon Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*, 6eme édition, Bachelier, Paris, 1840, p.4

[14] *Les Deux Cultures* (en anglais, The Two Cultures) constitue la première partie d'une conférence prononcée en 1959 par le scientifique C. P. Snow dans le cadre des conférences Rede où il montre que la vie de l'ensemble de la société est constituée par deux cultures qu'on semble souvent opposer, à savoir les humanités et les sciences, alors qu'elles participent de la même culture humaine.

de milliards de particules qui ne peut qu'engendrer le chaos ou désordre du système qui les compose.

Il s'agit en même temps de prendre en compte les acquis légués par Epicure dans son *clinamen* qui voudrait que ces trajectoires se mélangent, pour créer des déviations, des chocs et des entrechocs où l'avenir du système échappe à l'observateur, fût-il le génie de Laplace. D'où le passage de la dynamique classique, qui fut une dynamique des trajectoires individuelle, à la thermodynamique, qui est une dynamique des trajectoires d'ensemble dont l'avenir est imprédictible. Ilya Prigogine, pour marquer cette rupture paradigmatique entre la science *désenchantée* fortement déterministe et la science *réenchantée* indéterministe et imprédictible, parlait de *« La fin des certitudes »* en science.

Charles Darwin avait déjà prévu cette imprédictibilité dans sa théorie de l'évolution des espèces, quand il pose qu'une évolution d'ensemble d'une population d'individus finit par engendrer, sur une longue période, une dérivation de l'espèce. L'évolution future d'une telle population d'individus est donc incertaine sur de longues portées. La thermodynamique est exactement comme cette évolution d'une population d'individus formant un système. Au bout d'une longue période d'évolution d'ensemble, le système finit par perdre sa mémoire au point de ne pouvoir rien prédire ni retrodire à cause du désordre qui y règne, consécutif au mélange de trajectoires. Cet état des choses est la résultante de la prise en compte de la notion de trajectoires d'ensemble qui est au cœur de la thermodynamique, et non plus la prise en compte des simples trajectoires individuelles de la dynamique classique. Aussi, puisque tout dans l'univers est constitué de population d'atomes, la thermodynamique sera considérée comme une catégorie qui rend compte du fonctionnement de tous les objets de la nature ou de l'univers. Tout objet de l'univers est désormais envisagé comme étant fait de milliards de milliards de particules élémentaires mesurées à notre échelle en mole. Une mole vaut $6{,}02\text{x}10^{23}$ N particules élémentaires. Ce qui correspond à un chiffre exponentiel. A partir de ce tournant décisif, la thermodynamique sera posée en science. Elle peut être définie, de ce point de vue, comme un système constitué de particules engagées dans une évolution d'ensemble dont l'issue est incertaine, le système étant, par principe, un système non-intégrable, c'est-à-dire instable. En fait, tous les systèmes à partir de trois corps sont non-intégrables à cause des légères déviations des

trajectoires engendrées par les influences réciproques des particules qui la constituent. C'est ce que la géométrie de l'espace appelle *divergences de Poincaré* par reconnaissance à Pierre Henri Poincaré qui avait découvert le *système à trois corps* par hasard.

La thermodynamique est ainsi la nouvelle clé de lecture de la nature. Car, en effet, tout dans la nature est un système thermodynamique. Le système thermodynamique lui-même étant une portion de l'univers délimitée par des frontières réelles ou imaginaires. Un pareil système a un certain nombre de propriétés dont la plus fondamentale est l'entropie. Celle-ci peut être définie de plusieurs manières, suivant l'angle de vue où on se place. Mais, elle est très souvent définie comme le taux de désorganisation d'un système thermodynamique. C'est pourquoi en son deuxième principe, qui est aussi son principe fondamental, il est dit que l'entropie d'un système thermodynamique est toujours croissante ou nulle. Cette croissance de l'entropie correspondant à l'augmentation du désordre interne du système jusqu'à l'atteinte du seuil d'entropie maximale qui équivaut à une entropie nulle.

Dans thermodynamique classique, on estimera que l'entropie d'un système thermodynamique ne peut que croître. Or, cette croissance de l'entropie qui correspond à l'augmentation du désordre du système est la métaphore de la mort, de la désintégration, de la désorganisation. Si l'entropie d'un système thermodynamique est donc toujours croissante ou nulle, l'entropie de l'univers augmente logiquement, car celui-ci est considéré comme un système thermodynamique géant. Ainsi, un des pères de la thermodynamique classique, du nom de Ludwig Boltzmann, prophétisa scientifiquement la mort thermique de l'univers à partir de l'évolution croissante de son entropie, mais ces prédictions ne se réaliseront pas. Cela est révélateur d'un problème interne au domaine. La thermodynamique classique contiendrait-elle des erreurs au point d'observer des promesses non tenues ? De cette méprise du physicien autrichien, nous pouvons aussi ajouter le fait que l'existence nous permet de constater des structures qui développent la vie, celles qui tendent à s'organiser ou qui luttent pour ne pas se désintégrer. C'est fort de ces observations que nous nous sommes arrêté pour examiner le fonctionnement des systèmes thermodynamiques locaux et celui de l'univers, pour voir si réellement ces systèmes annoncent la mort, la fatalité ou alors c'est plutôt le contraire. L'entropie d'un système thermodynamique est-elle toujours croissante ?

Cette question se rapporte aussi aux catégories existentielles, car une entropie croissance en physique annonce la mort du système étudié qui peut être un système biologique ou un système non biologique. Tandis qu'une entropie non croissante ou décroissante est synonyme de vie. De ce point de vue, la situation d'une entropie croissante est une fâcheuse nouvelle, tant pour la matière biologique que pour la matière non biologique. Ainsi pourrait-on dire que l'existence humaine est menacée par la croissance entropique qui s'attaque non seulement à l'univers dans lequel elle suit son cours, mais aussi à sa propre nature d'être biologique qui subit les effets de l'entropie. La philosophie en tant que réflexion sur l'existence humaine ne saurait être en reste, par rapport à une question qui touche aux préoccupations existentielles. Comprendre l'entropie puisqu'elle est en lien avec la vie devient donc quelque chose de très essentiel. On peut citer à ce titre Luc Ferry qui pense qu'il ne s'agit plus simplement aujourd'hui de comprendre les choses et le monde ou de se comprendre soi-même, mais de les comprendre pour sauver sa peau. Pour lui : *« comme le disent chacun à leur façon plusieurs penseurs contemporains, on ne philosophe pas pour s'amuser, ni même pour comprendre le monde et se comprendre mieux soi-même, mais parfois pour "sauver sa peau". »*[15]

Cela dit, notre problème revient à interroger le sens de l'entropie comme catégorie fondamentale voire et architectonique en thermodynamique. Ce sens de l'entropie est ce qui constitue la quintessence de la thermodynamique, car toutes les autres questions lui sont agrégées (enthalpie, énergie, température etc.) Si pour le physicien, l'entropie se ramène à des simples calculs physico-mathématiques (l'entropie étant une fonction mathématique correspondant à un état additif), c'est une question vitale pour le philosophe. En effet, le sens de son évolution est porteur d'un message pour l'homme et pour tout l'univers, une évolution positive signifiant la mort, la fin, la décrépitude de l'être. Tandis qu'une évolution négative signifie ordre, organisation qui sont les métaphores de la vie, toutes choses qui ouvrent sur l'espérance. Cette question du sens de l'entropie met la destinée humaine au centre des préoccupations. Cela est d'autant plus lié à l'existence humaine que l'histoire des idées scientifiques nous rapporte une tragédie des chercheurs morts par anxiété à l'idée que l'entropie augmente, au lieu de diminuer. Le destin commun du genre humain serait donc scellé. Car ce sens d'évolution entropique annoncerait le pire pour notre l'avenir. Fort heureusement que l'espérance en ces prophéties scientifiques avait

[15] Luc Ferry, *Apprendre à vivre*, Edition Plon, 2006, p.10

été déçue qu'il a fallu, à un moment donné, revenir sur un certain nombre d'aspects. La question est tellement sérieuse qu'elle ne saurait donc se limiter au seul champ de réflexion de la physique. C'est ainsi qu'elle nous préoccupe, tout comme elle devrait préoccuper tout homme. Car, c'est de notre destin commun dont il s'agit. Cela dit, il est essentiel et urgent de s'armer de connaissances en thermodynamique pour ressortir le vrai sens de l'entropie, afin de dégager son vrai message au cas, où celui que la thermodynamique classique nous livre serait empreint de quelle qu'erreur que ce soit. Cela nous permettra de réinterroger, non seulement, les entropies locales, mais aussi, l'entropie universelle. A l'issue, il s'agira pour l'homme de prendre au sérieux ce message, de le capitaliser à son compte, en revoyant son attitude, au cas où il y aurait là des choses qui dépendraient de lui.

Nous avons jeté notre dévolu sur cette thématique pour analyser la vie sur un socle tout à fait original. Les sciences fondamentales de la matière (physique et chimie) peuvent-elles rendre compte de la vie ? Il s'agira de se demander si la simple croissance de l'entropie qui signifie la mort thermique pouvait nous permettre d'arriver à une compréhension de la mort biologique. Et à l'inverse, il s'agira également de savoir si la décroissance de l'entropie qui est la métaphore de la vie, au cas où cette décroissance était avérée, pourrait nous livrer le secret de la vie. La vie est-elle une simple question de croissance et de décroissance entropique ? Il s'agit de se demander si la physique a enfin trouvé la réponse à la sempiternelle question métaphysique : qu'est-ce que la vie ? Une question qui, aujourd'hui, n'est pas étrangère aux thermodynamiciens qui l'ont explicitement formulée, à l'instar d'Erwin Schrödinger qui, dans son livre *Qu'est-ce que la vie ?,* cherche l'explication dans la physique. Notre motivation repose sur le fait d'examiner jusqu'où peut aller la physique pour donner réponse aux problèmes existentiels de l'homme, surtout celui lié à la vie. Il est donc question de voir si l'on peut se contenter de comprendre la vie à partir de la production d'entropie.

Par ailleurs, nous avons également choisi cette thématique, parce qu'il nous a semblé original de parler de l'atomisme, non pas dans une description individuelle de l'atome mais dans une description d'ensemble de paquet d'atomes. Tout ce que nous ressentons à notre échelle est la résultante du comportement des atomes à l'échelle microscopique. La thermodynamique nous permet donc de savoir ce qui se passe en deçà de nous, et qui détermine le macro-état que nous

apercevons à notre échelle. La chaleur, la température, la pression ne sont, en fait, que des manifestations de l'entropie ou alors du comportement des atomes d'un système thermodynamique. La thermodynamique est donc la clé de la connaissance du réel. Tout ce qui existe n'est fait que d'atomes, mais tout dépend de leur disposition, de leur état d'excitation, des mouvements qu'ils effectuent. La thermodynamique nous permet de dire pourquoi le chaud est chaud, ou pourquoi le froid est froid, ou encore pourquoi telle structure vit et pourquoi telle autre meurt.

En termes de contribution scientifique, dans le présent travail qui est une réflexion philosophique relevant de l'épistémologie, il est question de remettre en question le principe fondamental à partir duquel la thermodynamique de l'univers fut établie pour le remplacer par d'autres principes thermodynamiques qui collent mieux avec les faits. Il sera question de démontrer que le paradigme actuel coince au point de produire des contre-vérités et des pétitions de principe qui exigent une négation radicale, situation où on doit repasser certains contenus épistémiques ou disciplinaires sur le domaine en revue pour distinguer l'ivraie du vrai.

Cela dit, la première partie qui s'intitule *« La thermodynamique moderne : une critique de la vision classique de l'entropie »* pose les bases de la thermodynamique, pour une intelligibilité de tout le travail. Elle commence par une critique de la vision classique de l'entropie. Cette vision classique reposait sur le second principe de thermodynamique, principe qui soutient que l'entropie d'un système isolé ne peut que croître au cours du temps jusqu'au seuil critique d'entropie maximale. Ce dépassement de la thermodynamique classique privilégiera deux aspects. D'une part, il sera question des contacts à l'échelle macroscopique qui nous permettent de faire l'expérience des entropies décroissantes au quotidien à partir des structures hautement organisées qui foisonnent autour de nous et, d'autre part, il sera question d'analyser les comportements moléculaires qui, très souvent intègrent les dissipations d'énergie. Celles-ci (dissipations) sont techniquement liées à la décroissance de l'entropie. Tout ceci permettra de relativiser le second principe de thermodynamique, faisant de la croissance entropique quelque chose de statistique, et non plus une nécessité absolue. Ensuite, nous exposerons la production d'entropie dans les systèmes isolés. Car, c'est cette catégorie de systèmes qui posent problème ; puisqu'il est établi que les autres catégories (systèmes ouverts et fermés) peuvent faire croître ou

décroître l'entropie selon les contraintes extérieures au système. C'est à ce niveau que nous ferons une brève histoire de la notion d'entropie, en partant des ingénieurs tels James Watt, Sadi Carnot, Rudolf Clausius, qui considérèrent l'entropie comme une perte irrécupérable dans le fonctionnement normal d'un moteur, jusqu'aux physiciens tels que Ludwig Boltzmann ou Max Planck qui le posèrent dans un cadre purement mathématique à travers la thermodynamique statistique qui détermine les micro-états d'un système donné, faisant désormais de l'entropie, non plus l'expression des pertes irrécupérables dans le cycle d'un moteur, mais plutôt le taux de désordre de ce système. Nous terminerons cette partie en menant une réflexion au-delà des systèmes isolés. Il sera question de parler des systèmes ouverts et fermés qui développent clairement une entropie décroissante ou croissante selon les contraintes de l'environnement. Nous clôturerons cette partie en évoquant les systèmes vivants qui sont des systèmes ouverts développant, non pas une vie simplement thermique mais plutôt thermique assortie de processus biologiques dits processus vitaux.

La deuxième partie qui s'intitule *« Apories de l'approche théorique d'une entropie décroissante »* nous permettra, en premier lieu, de poser les difficultés théoriques de la formulation d'une entropie décroissante. Ici il est question d'interroger le type de système que constitue l'univers (isolé, fermé ou ouvert). La difficulté de répondre à cette question rend compte de l'inconfort à déterminer exactement son comportement entropique. En deuxième lieu, cette partie nous permettra de parler des obstacles méthodologiques de la vérification d'une entropie universelle. Ici, il sera question de souligner l'écart entre les énoncés théoriques universels et la possibilité de vérification de tels énoncés par des observations, obligeant la science à procéder par des inductions amplifiantes où l'entropie universelle serait une sorte d'entropie locale amplifiée. Nous terminerons cette partie en relevant quelques problèmes posés par le modèle standard pour préparer le lecteur au changement de paradigme opéré à la troisième partie.

La troisième partie nous permettra à son tour de construire le nouveau paradigme de compréhension de la thermodynamique en général et de la thermodynamique universelle en particulier. Dans un premier temps, il sera question de réécrire les entropies locales à partir du second principe de thermodynamique sans extrapoler à l'échelle universelle, et de réécrire l'entropie universelle, à partir du troisième principe de thermodynamique qui colle mieux avec

les températures très basses comme celle que connaît l'univers. Dans un deuxième moment, nous ouvrirons une brèche au problème écologique en rapport avec la thermodynamique, soutenant le fait que le système planétaire est un système thermodynamique ouvert dont il faudrait éviter de faire croître l'entropie par l'activité civilisatrice du monde capitaliste ou tout autre comportement propre à la faire augmenter, au risque que nous rompions le fil sur lequel nous tenons tous. Dans le troisième moment, nous actualiserons les débats en mettant côte à côte deux notions aussi voisines que lointaines selon les cas, à savoir le principe entropique et le principe anthropique, pour dire que la vie n'est pas seulement une question de lois physiques, mais la résultante d'un ajustement fins de ces lois à un moment donné de l'histoire de l'univers, par une Volonté, peut-être. C'est ce qui rend compte des phénomènes vitaux qui transcendent le domaine de la physique et qui constitueraient le secret de la vie. Qu'à cela ne tienne, à défaut de pouvoir rendre compte fidèlement de la vie (biologique dotée complexité à n'en pas finir) et spécifique à la biosphère, nous trouverons à la physique une solution émergente qui pose une vie proprement thermique intelligente, très proche de la vraie vie et répandue dans tout l'univers appelée *vye* (ou *lyfe* en anglais), développant une entropie négative avec des propriétés qui rappellent la vie biologique, mais sans en être une, par manque de développement des processus vitaux. Cela nous permettra de situer la vie au-delà de l'entropie même si celle-ci en est un aspect important.

PREMIERE PARTIE

LA THERMODYNAMIQUE MODERNE : UNE CRITIQUE DE LA VISION CLASSIQUE DE L'ENTROPIE

INTRODUCTION PARTIELLE

L'entropie est, à l'origine, une notion de physique avant d'être récupérée par d'autres disciplines qui lui accordent un intérêt certain aujourd'hui. Elle a été découverte, puis formulée dans le cadre de la thermodynamique où elle fut longtemps associée à la mesure du désordre d'un système. Elle est, en réalité, une notion mathématique décrivant le comportement de l'énergie qui, a tendance à se diffuser dans toutes les parties du système, pour atteindre un seuil chaotique maximal. Cela dit, l'entropie est souvent définie comme la mesure du taux de désordre d'un système thermodynamique donné. C'est ce qui ressort de la plume d'Uvarov E.B quand il affirme :

> The entropy of a system is a measure of its degree of disorder. The total entropy of an isolated system can never decrease in any change; it must either increase (irreversible process) or remain constant (reversible process). The total entropy of the Universe therefore is increasing, tending towards a maximum, corresponding to complete disorder of the particles in it.[16]

Cela signifie que le rôle de l'entropie est de mesurer le taux de désordre d'un système thermodynamique. Dans une transformation réelle, ce taux est essentiellement croissant jusqu'à atteindre son seuil maximal qui correspond à la mort thermique par diffusion de toute l'énergie mécanique dans le système. Par ailleurs, il est établi qu'en physique, il existe deux types de transformations : les transformations réelles qui sont irréversibles et les transformations fictives qui sont réversibles. Les processus irréversibles dont parle Uvarov caractérisent les transformations réelles. Aussi la thermodynamique classique nous lègue-t-elle l'héritage d'une entropie essentiellement croissante dans les situations réelles. Cela signifie, en d'autres termes, que la matière, dans la réalité des faits, a tendance à aller de l'ordre au désordre au point où la théorie physique prédit une mort thermodynamique de toute la matière existante lorsque l'entropie universelle aura atteint son maximum. Cet état de choses a terrifié Ludwig Boltzmann, grand thermodynamicien par ses travaux, ses découvertes et surtout la formule éponyme de l'entropie qu'il a laissée, tant et si bien que la légende raconte qu'il serait mort, rongé par cette vision pessimiste de l'entropie qui prédit un seuil chaotique universel maximal. Cette première

[16]Eugene Boris Uvarov, *Dictionnary of sciences*, (revised with assistance of Dr. Chapman B.A), The Whitefriars Press, London and Tombridge, 1994, p 85.

partie se veut un dépassement de cette vision classique essentiellement croissante du désordre de la matière à petite échelle et à grande échelle, afin de poser l'entropie, non plus comme un principe uniquement destructif mais aussi constructif dans beaucoup de cas de figure.

CHAPITRE 1 : CRITIQUE D'UNE VISION CLASSIQUE DE L'ENTROPIE

Dans ce chapitre, nous allons davantage montrer que la formulation classique d'une entropie essentiellement croissante, correspondant à l'augmentation du désordre dans la matière, est démentie, d'une part, par des constats à l'échelle macroscopique et, d'autre part, par l'analyse des comportements des moléculaires, relevant de l'échelle microscopique. Avant de toucher aux questions plus délicates et plus techniques, il s'agit, pour nous, de commencer par ces constats empiriques tirés des situations quotidiennes de notre environnement immédiat (approche macroscopique) et sur l'analyse des comportements moléculaires dans un système thermodynamique (approche microscopique).

1.1. Constats à l'échelle macroscopique

1.1.1. Des structures macroscopiques hautement organisées

Avant de parvenir à des réflexions plus compliquées et complexes dans le discours comme dans la démonstration, il nous a semblé important de sonder le réalisme de la théorie physique qui milite en faveur de la croissance de l'entropie, à partir de notre expérience quotidienne. C'est ce que nous entendons par constats à l'échelle macroscopique. Car, la physique dont nous nous proposons d'évaluer la théorie est une science empirique, c'est-à-dire une science qui a pour base de l'observation des phénomènes et leur expérimentation. C'est un de ses principes fondateurs, structurants voire architectoniques. L'exemple illustratif est le cas d'Isaac Newton qui, partant de l'observation de la chute d'une pomme, découvrit puis théorisa la loi de la gravitation universelle. C'est ainsi que, fidèle à la troisième règle de la méthode cartésienne qui suggère de *« conduire avec ordre [ses] pensées, en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à comprendre, pour monter peu à peu, comme par degrés, vers les connaissances des plus compliquées »*[17], nous avons choisi l'observation empirique de notre environnement comme point de départ de ce renversement paradigmatique. C'est ce que suggère

[17] René Descartes, *Discours de la méthode. Pour bien conduire sa Raison et rechercher la vérité dans les sciences*. (1637), édition électronique ePub) : Les échos du Maquis,2011.

Grégoire Nicolis quand il affirme : *« La science est avant tout une entreprise de type expérimental, de sorte que c'est en observant alentour que nous nous ferons une idée de la généralité et de l'importance des phénomènes complexes. »*[18]

Cela dit, l'observation immédiate de notre environnement ne nous laisse guère apercevoir des structures simples, mais plutôt des structures complexes et composées. Chaque objet que nous apercevons à l'échelle macroscopique est une structure complexe. On pourrait plutôt dire que rien n'est simple ou plutôt que les choses ne sont simples qu'en apparence. Mais, quand on y prête attention, elles sont toujours composées, tissées, reliées. Cela étant, on se demande dans quel état se trouve la nature dans ces structures complexes ? A cette question, nous pouvons dire que deux éventualités sont possibles : soit la structure présente une constitution organisée et ordonnée soit elle présente un état chaotique.

L'état chaotique c'est un état de désordre ou de désorganisation des constituants de la structure étudiée. Cela suppose que les microstructures de cette structure ne s'intègrent pas au sein de celle-ci qui a donc tendance à se désintégrer au fur et à mesure.

Par contre, l'organisation suppose que les microstructures qui constituent ladite structure se tiennent de façon harmonieuse pour former un tout unifié. Pour Edgar Morin qui développe une pensée de la complexité et de la *reliance*, les objets de notre expérience quotidienne sont des objets complexes bien agencés ensemble. Il déclare : « *Quand je parle de complexité, je me réfère au sens latin élémentaire du mot "complexus", "ce qui est tissé ensemble". Les constituants sont différents, mais il faut voir comme dans une tapisserie la figure d'ensemble* ».[19]

Des deux états dans lesquels on peut trouver les structures de notre environnement, l'état macroscopique le plus probable est l'organisation. C'est ce qui apparait en premier lieu quand nous observons la nature. Il en ressort que le monde qui nous entoure est constitué de structures macroscopiques complexes et harmonieuses. Ces structures qui sont des systèmes ordonnés et bien organisés, sont souvent constituées de microstructures tissées ensemble entre elles, formant des corps. Notre environnement de tous les jours nous offre donc des structures complexes formées de microstructures et reliées les unes aux autres. Fort de cette observation, on est amené

[18]Grégoris Nicolis et Ilya Prigogine, *A la rencontre du complexe*, PUF, Paris, 1989, p. 12.
[19] Edgard Morin, *« La stratégie de reliance pour l'intelligence de la complexité »* in *Revue internationale de systémique*, AFCET système, Paris, vol 9, n°2, 1995.

à comprendre que la matière a une forte tendance à se trouver sous une forme organisée et à y rester plutôt qu'à passer à une forme désorganisée. Au vu de ce constat, il s'avère que la tendance générale des structures macroscopiques que nous côtoyons au quotidien est l'état d'harmonie, d'ordre voire d'organisation. Ce sont presque toutes des structures reliées, tissées et organisées.

Par ailleurs, quand on essaie de pousser l'observation plus loin, on se rend compte que, la plupart de ces structures ne sont pas seulement de simples structures organisées, mais des structures hautement organisées dont la complexion et le fonctionnement impressionnent souvent l'observateur. Ce sont généralement des structures dont le fonctionnement est souvent mécanisé avec une précision accrue. Une organisation presque parfaite et imperturbable qui fait parfois délier les langues des poètes pour chanter la beauté du réel. Or, ces structures organisées ou hautement organisées ne sont pas le fruit du hasard : elles expriment un principe thermodynamique, à savoir que leur entropie est décroissante. Une entropie décroissante a tendance **à maintenir** les microstructures organisées voire les ramener à l'organisation. Tandis qu'une entropie croissante produira l'effet inverse. Cela étant, nous pouvons dire que l'observation directe des structures qui constituent notre environnement laisse un constat simple, à savoir que l'organisation est une évidence quand on observe les structures de la nature ; cette organisation est le langage de la nature en faveur de la décroissance de l'entropie. En d'autres termes, la décroissance de l'entropie est l'expression de la dissipation de l'énergie interne de la structure afin qu'elle puisse se garder dans l'harmonie et l'ordre.

Il apparaît évident que, parmi ces structures de notre environnement immédiat, qui forment des systèmes complexes, certaines ont même tendance à conserver leur organisation et leur ordre en cas de perturbation ou d'agression troublant le fonctionnement d'ensemble. C'est le cas des organismes humains, animaux ou végétaux, ou certains environnements physiques, des écosystèmes etc., qui luttent pour maintenir leur organisation intacte et ce, malgré les diverses violations qu'ils subissent. Lorsqu'il y a un disfonctionnement, le système tend à revenir à l'organisation et à l'ordre habituel.

Par contre, nous remarquons que certaines autres structures macroscopiques complexes, sous-entendues tissées de microstructures reliées entre elles, ne reviennent pas à leur organisation ou à leur ordre de départ après une perturbation. Ces structures sont généralement les structures inertes ou inanimées, c'est-à-dire, qu'elles ne possèdent pas de vie biologique.

En effet, que ce soit les structures qui reviennent à leur organisation ou celles qui n'y reviennent pas du tout, toutes constituent des systèmes thermodynamiques. Car un système thermodynamique n'est rien d'autre que toute portion de l'univers délimitée par des frontières réelles ou imaginaires. C'est dans ce sens qu'Arthur Shavit et Arthur Chaim Gutfinder, deux physiciens, parlant du système thermodynamique affirment :

> For the purpose of thermodynamic analysis we usually focus our attention on a finite amount of matter, which is separated from its surroundings, and is called a system. A system is defined by whatever is enclosed within a clearly specified boundary. Hence, for a system to be defined, one must specify its exact boundaries and the contents within these boundaries. [20]

En d'autres termes un système thermodynamique est un objet d'étude délimité par des frontières et renfermant en son sein un contenu quel qu'il soit. En partant de cette lecture, on peut remarquer sur la base de l'observation empirique, qu'il existe des systèmes qui présentent une tendance à revenir à l'ordre et d'autres qui ne présentent pas cette tendance. De ce constat empirique à partir d'une observation à notre échelle, il apparaît que les systèmes vivants, contrairement aux systèmes non vivants, n'obéissent pas au deuxième principe de thermodynamique en rapport avec la croissance entropique édictée par la thermodynamique classique. Fort de cette expérience, il est logique d'émettre des doutes sur la tendance naturelle de la matière à aller vers le désordre. Les structures hautement organisées de notre environnement sont une preuve suffisante qu'une autre approche de l'entropie est envisageable tant il est vrai que les structures de notre environnement ont tendance à maintenir voire à renforcer leur organisation et leur ordre.

La question que nous nous posons est de savoir : quel est l'avenir de cette organisation ou de cette harmonie observée dans les structures qui constituent notre environnement quotidien ? Est-ce une organisation précaire qui tend, de manière irrésistible, vers le désordre ou bien une organisation qui se maintient au mépris des perturbations extérieures ? Cette question nous permet de voir comment les systèmes vivants de notre environnement, dans leur lutte permanente pour le maintien de leur organisation, c'est-dire le maintien de la vie, parviennent à une autorégulation appelée l'homéostasie.

[20]Arthur Shavit and Chaim Gutfinder, *Thermodynamics. From concepts to applications*, CRC Press Taylor and Francis group, 2008, p.6

1.1.2. Des structures homéostatiques

A notre questionnement qui consiste à savoir si les structures complexes de notre environnement maintiennent leur organisation ou la perdent selon les circonstances, la réponse est que certaines la maintiennent ou plutôt luttent pour la maintenir quel que soit ce qui puisse arriver. D'autres, par contre, ne la maintiennent pas et ont tendance à se désorganiser au fur et à mesure que le temps passe.

En d'autres termes, puisque cette partie est consacrée au constat au niveau macroscopique, on se rend compte, sur la base de l'observation, que les structures qui maintiennent leur organisation ou qui luttent pour la maintenir sont généralement celles qui comportent la matière animée ou vivante. Tout le monde a certainement fait cette expérience d'observer une plante, un animal. Leurs organismes présentent une complexion harmonieuse qui peut durer le plus longtemps possible. Ceci est dû au phénomène de régulation de l'équilibre du milieu intérieur, à telle enseigne que les pertes en énergie sont compensées par ce que leur fournit le milieu extérieur. C'est un aspect très capital sur lequel nous reviendrons en profondeur dans la suite, au chapitre 3, dans le cadre de la typologie des systèmes thermodynamiques, entre systèmes ouverts, systèmes fermés et systèmes isolés.

En effet, les structures vivantes sont des systèmes ouverts. L'entropie de ces systèmes a la possibilité de décroître pour réduire le taux de désorganisation de l'ensemble et leur éviter la mort thermique qui arrive, selon les prévisions théoriques (conformément au second principe), aux systèmes isolés en général parce qu'ils ne peuvent pas se servir de leur environnement. C'est ce que nous disent Luis Felipe del Castillo et Paula Vera-Cruz lorsqu'ils affirment, dans un article: « *He considered the organism as an open system in stationary state, which evolves in the direction that entropy production decreases, and reaches a minimum when the adaptation to the environment has concluded.»*[21]Ils rassurent ainsi dans la conviction que le système vivant est un système thermodynamique ouvert sur l'environnement avec lequel il effectue des opérations. Pour que la vie soit maintenue et que le système reste organisé, les frontières seront le lieu de récupération de la matière, de l'énergie et de la chaleur qui permettront d'éliminer l'entropie pour que, non seulement la vie, mais aussi l'organisation, soient rétablies. Ce mécanisme correspond

[21]Luis Felipe del Castillo, Paula Vera-Cruz, *Thermodynamic Formulation of Living Systems and Their Evolution* in Journal of Modern Physics, 2011, 2, 379-391

au fonctionnement des systèmes vivants et participe de l'homéostasie, comme nous pouvons le lire dans ces lignes de Luis Felipe del Castillo, Paula Vera-Cruz :

> Organic systems are described as thermodynamic systems where entropy is produced by the irreversible processes, considering as an established fact that this entropy is eliminated through their frontiers to preserve life. The necessary and sufficient conditions to describe the evolution of life in the negentropy principle are established. Underlining the fact that the necessary condition requires formulation, which is founded on the principle of minimum entropy production for open systems operating near or far from equilibrium [22]

Cela signifie que pour que le système vivant garde sa complexion harmonieuse et ordonnée, les frontières du système devront être le lieu de la régulation pour faire décroître l'entropie totale du système quitte à rétablir l'équilibre homéostatique.

Toutes choses égales, le rôle du milieu extérieur dans la conservation de l'harmonie observée est donc incontournable. Ceci est dû au fait que la vie est un principe d'ordre et non pas de désordre. Quand le désordre survient, survient en même temps l'homéostasie pour le faire décroître jusqu'au seuil minimal entropique. Car, la vie a tendance à se maintenir, à se reproduire et à se perpétuer. Si donc les systèmes thermodynamiques vivants sont généralement des systèmes ouverts sur leur environnement avec lequel ils effectuent des échanges leur permettant de compenser leur perte en énergie, cela signifie simplement que l'entropie de ces systèmes a tendance à décroître. Car, comme cela est connu, l'entropie décroissante correspond à une augmentation à l'énergie fraîche (utilisable) reçue par le système qui, au lieu de courir vers la mort thermique, par la croissance de son entropie, comme cela est prédit depuis Sadi Carnot, Rudolf Clausius ou Ludwig Boltzmann, développe alors une entropie décroissante pour freiner ou contrecarrer ce phénomène de mort thermique. Dans une étude antérieure, nous soulignions déjà la contribution de ces pionniers de la thermodynamique lorsque nous disions :

> Pourtant le deuxième principe de thermodynamique qui est un principe d'évolution énoncé par Sadi Antoine Carnot en 1824 et mis en forme par Rudolf Clausius milite en faveur de l'irréversibilité des phénomènes physiques, en particulier lors des échanges thermiques dans des systèmes isolés. Ce second Principe introduit *la fonction d'état entropie : "S"*, usuellement assimilée à la notion de désordre qui ne peut que croître au cours d'une transformation réelle. De façon simplifiée la *fonction d'état entropie S*, est considérée comme une mesure du désordre. C'est la *production* d'entropie, qui mesure les processus irréversibles *au sein du*

[22] Luis Felipe del Castillo, Paula Vera-Cruz,Luis Felipe del Castillo, Paula Vera-Cruz, *Thermodynamic Formulation of Living Systems and Their Evolution, Op.Cit.*

> *système*. C'est cette production d'entropie que le second principe définit comme toujours positive ou nulle[23].

De nos jours, ce constat est discutable. Bien qu'il ne soit pas faux. C'est simplement parce que, à leurs époques, certaines subtilités rattachées aux systèmes thermodynamiques n'étaient pas connues et prises en compte. Et toutes les complexités possibles que développent des phénomènes isolés n'étaient pas encore connues. Nous reviendrons également sur les complexités qu'on rencontre dans les systèmes isolés où la croissance de l'entropie est problématique, sur la base de la découverte des phénomènes, d'une part, loin de l'équilibre, et d'autre part, proche de l'équilibre thermodynamique, qui offrent souvent des productions d'entropie non conformes aux prévisions du second principe de thermodynamique.

Ce phénomène s'appelle néguentropie ; il se manifeste par une thermodynamique particulière dans les systèmes vivants, aux antipodes de celle qu'on rencontre dans la plupart des systèmes ou dans la matière inerte. Dans les colonnes de l'article de Jinya Otsuka que:

> When the first and second laws of thermodynamics have been established, Maxwell has raised the question about the compatibility of life with the second law in terms of a sorting demon. This question has been discussed by many physicists. For example, Szilard suggests that the demon actually transforms "information" into "negative entropy" […] The principles of thermodynamics, especially the second law, apply only to inert objects. Life is an exception to the second law, and a new principle of life will have to explain conditions contrary to the second law. [24]

Cela revient justement à dire que, le second principe de thermodynamique qui est le principe introduisant l'état entropique comme essentiellement croissant, fait faillite quand il s'agit de la thermodynamique des systèmes vivants. En effet, l'entropie étant quelque chose de destructif selon le deuxième principe de thermodynamique par le fait qu'il disperse l'énergie dans tout le système voire hors du système dans le cas des systèmes ouverts comme le sont les systèmes vivants, il est incompatible avec la vie qui, elle, exige quelque chose de constructif. C'est pourquoi la thermodynamique des systèmes vivants est une exception. Car, elle compense la croissance de l'entropie en maintenant l'équilibre du système. C'est cette thermodynamique spéciale que l'on appelle biothermodynamique avec la possibilité de la décroissance entropique d'un état élevé vers un état moins élevé. C'est ce qu'affirme Yi-Fang Chang, lorsqu'il parle de la décroissance entropique dans les structures biologiques : *« So long as different entropy states for*

[23]Jospin Brice FOE, *De la dynamique classique à la thermodynamique des processus de non-équilibre : une ontologie de la nature à partir de la physique, chez Ilya Prigogine* (mémoire), 2020, inédit, 2020, p.47

[24]Jinya Otsuka, *The Negative Entropy in Organisms; Its Maintenance and Extension* in Journal of Modern Physics, 9, 2156-2169, 2018

any systems exist, entropy should decrease in transformation process from a higher state to a lower state, for example, from chaos to order, from war to peace and so on. »[25]Ce qu'il faut comprendre est que l'entropie de ces systèmes vivants, dans les phases de transformation, passera toujours d'un seuil élevé vers un seuil moins élevé, ramenant le chaos vers l'ordre, la désorganisation vers l'organisation intérieure. C'est ce qui explique le maintien de l'harmonie des structures vivantes que nous rencontrons. En revanche donc, les systèmes vivants sont des systèmes ordonnés et organisés parce que leur entropie décroit d'un seuil élevé vers un seuil moins élevé permettant au système de maintenir sa structure intacte. Ces systèmes s'autorégulent par le mécanisme d'homéostasie. Selon Gabriella Hegyi, Gyula Vincze, Andras Szasz, ce phénomène est au centre de la biothermodynamique, à savoir : la thermodynamique de la matière vivante ou du système vivant. Elle se décline, selon ces penseurs, comme il suit :

> Life is based on energetically open systems, where the environmental conditions determine it as equilibrium. The living equilibrium is the homeostasis. The actual homeostatic state is definitely "constant" despite its energetically open status. The normal healthy state of any living system is in homeostasis, which is not static, but dynamically changes in time, forming a relatively stable state. This relative stability makes it possible to recognize the various individuals despite the fact that millions of their cells actually vanish and millions of those are reborn[26].

Comme Gabriella Hegyi, Gyula Vincze et Andras Szasz l'affirment, l'homéostasie est un phénomène qui caractérise les systèmes vivants. Son avantage est qu'il permet aux systèmes de se maintenir malgré les pertes qu'il peut connaître et de rester égal à lui-même. Elle agit en réduisant l'entropie du système par les **échanges aux bords**. Cela dit, la structure aussi maintient son harmonie et sa complexion, et partant, l'individu reste égal à lui-même malgré les pertes dues à la croissance de l'entropie. Nous le disons pour trouver des éléments de réponse à notre question de départ, à savoir les structures de notre environnement maintiennent-elles leur organisation ou non ? Aussi l'organisation, l'ordre et l'harmonie peuvent se maintenir à l'intérieur de ces structures le plus longtemps qui soit.

Ce qui précède montre qu'il existe plusieurs types de systèmes thermodynamiques. D'aucuns développent une entropie croissante et d'autres une entropie décroissante. Cela est suffisant pour remettre en question la vision classique de l'entropie selon laquelle celle-ci serait

[25]Yi-Fang Chang, *Entropy decrease in isolated systems: theory, facts and test, in International Journals of Fundamental Physical Science (IJFPS) Vol 10, N^0 2*, p. 1--24.

[26] Gabriella Hegyi, Gyula Vincze, Andras Szasz, *On the Dynamic Equilibrium in Homeostasis*, in Open Journal of Biophysics, 2012, 2, 64-71

essentiellement croissante afin de postuler pour une entropie bidirectionnelle. Pour ce faire, il est question d'analyser les deux statuts de la matière bien connue par tous, à savoir la paire ordre/ désordre.

1.1.3. De la dichotomie ordre/désordre : une bidirectionnalité de l'entropie ?

Quel est le statut de la matière ? En d'autres termes, en quel(s) état(s) la matière peut-elle se trouver ? Par rapport à cette question, nous avions déjà amorcé la réflexion jusqu'à un certain niveau dans une recherche précédente sur l'ontologie de la matière d'après Ilya Prigogine, et nous répondions, au final, que, le statut de la matière est d'être hors de l'équilibre thermodynamique. La conclusion à laquelle nous aboutissions est la suivante : *« La thermodynamique des processus de non-équilibre, voilà notre aboutissement sur la nature du réel dans sa manifestation concrète ; voilà le statut de la matière physique. Elle est toujours en déséquilibre, et permanemment à la recherche de son état d'équilibre, un état jamais atteint, sinon exceptionnellement dans des cas extraordinaires. »*[27] Par la suite, nous ajoutions que *« Pour terminer, nous pouvons retenir que le statut de la nature est d'être un système thermodynamique de non-équilibre. C'est le non-équilibre qui engendre l'instabilité, et l'instabilité elle-même est responsable du dynamisme qu'on lui reconnait. »*[28]Selon cette étude, le statut de la matière est d'être hors de l'équilibre. Nous la dénommions la thermodynamique des processus de non-équilibre ou des processus hors de l'équilibre, selon Ilya Prigogine à qui nous devons la paternité du concept de la thermodynamique non linéaire des processus de non-équilibre. C'était en dépassement de la dynamique classique qui était une dynamique de l'équilibre, de l'ordre, de la régularité, de la stabilité de l'isotropie. Toutes choses qui frisent l'idéalité voire le mythe. La science classique n'a pas d'ailleurs échappé à cette critique d'être un mythe et ses formulations des idéalités. Nous pouvons également reprendre ici ce que nous écrivions à ce propos :

> Cette physique traditionnelle va donc faire de la science un mythe, et fausser l'ontologie de la nature physique. Ce ne sera pas la nature qui parlera mais le savant dans son mythe scientifique. C'est ce qu'on appellera le dialogue expérimental, dialogue à sens unique. Prigogine déclare à propos que «La science, selon Kant, ne dialogue pas avec la nature, mais lui impose son langage. »[29]

[27]Jospin Brice FOE, *De la dynamique classique à la thermodynamique des processus de non-équilibre : une ontologie de la nature à partir de la physique, chez Ilya Prigogine* (mémoire), 2020, *Op.Cit*. p.133.
[28]*Idem, p.132.*
[29]Jospin Brice FOE, *De la dynamique classique à la thermodynamique des processus de non-équilibre : une ontologie de la nature à partir de la physique, chez Ilya Prigogine (mémoire), 2020, Op. Cit. p. 133*

En effet, si la nature était en ordre, elle ne nous donnerait aucune information. On ne distinguerait rien d'elle : tout y serait pareil. C'est ce que ce que nous rapporte le psychologue quantique Tom Stonier dans la métaphore du *nuage de l'inconscience,* une métaphore d'un moine anonyme qui décrit, dans un exemple de pensée où, avant que ne naisse le déséquilibre, l'équilibre a prévalu ; laquelle situation n'eût pas permis de se repérer dans l'espace et dans le temps à cause de l'isotropie et de la symétrie qui y régnaient. La métaphore raconte :

> Si vous vous imaginez dans un nuage uniforme d'une taille infinie, vous vous rendriez compte que vous êtes désespérément perdu ; partout où vous regarderiez, vous ne verriez que le même champ uniforme de brume sans aucune forme pour vous informer de l'endroit où vous êtes, pas même de repérage entre le haut et le bas. Les mathématiciens et les physiciens appellent cette homogénéité totale un état de symétrie ; tout est identique- symétrie dans toutes les directions. Rien ne peut exister dans un univers de symétrie complète ou uniformément identique[30].

Dans un pareil monde complètement en équilibre, stable, homogène et isotrope en toute part, rien n'est rien et tout est tout. L'entropie d'un pareil monde serait égale à zéro. Le système est fictif ou imaginaire. Or, il est admis que l'entropie des transformations fictives est de l'ordre de zéro selon la formule suivante : $S_{créée} = \Delta_{Sys} + \Delta_{sext} = 0$. Cela dit, si l'ordre était le statut de la matière, l'entropie serait toujours de zéro. Ce qui n'est pas vrai d'après les calculs qui établissent bien que celle-ci varie. Et ces variations sont connues et calculables sur la base de la formule de la variation d'entropie ΔS : $\frac{Q1}{T1} + \frac{Q2}{T2} \geq 0$ où ΔS représente la variation d'entropie, Q_1 représente la quantité de chaleur au moment t_1, Q_2 représente la quantité de chaleur au moment t_2, T_1 la température au moment T_1 et T_2 la température au moment t_2. La formule montre que l'entropie n'est pas toujours de l'ordre de zéro, traduisant le fait que la structure ne se trouve pas toujours dans l'ordre.

Cela signifie simplement que l'ordre macroscopique est apparent. La nature serait plutôt dans un état de désordre ou état chaotique. C'est ce qui fait varier l'entropie. Si nous reprenons la métaphore du *nuage de l'inconscience* en admettant des changements de phases, il se passe une autre chose. La symétrie se brise et le déséquilibre survient :

> Imaginez maintenant que le nuage à l'intérieur duquel vous êtes perdu, est en réalité une vapeur qui se refroidit graduellement. Vous vous rappelez des tourbillons et des turbulences de l'eau dans la vapeur d'eau à cent degrés. Quand votre nuage se refroidit au-dessus de cent degrés et qu'il commence à se transformer en gouttelettes d'eau, il pleut. La symétrie uniforme du nuage est brisée : le nuage de vapeur s'est changé en une phase plus organisée de molécules que nous appelons l'eau. Comme la pluie tombe, vous pouvez maintenant savoir la différence entre le haut et le bas. L'abaissement de la température a maintenant brisé la symétrie du nuage, menant

[30]Stonier, T., *Information and the Internal Structure of the Universe*, New York : Springer-Verlag, 1990, p.70-72

> à l'organisation des gouttelettes ; de telle sorte que vous pouvez avoir l'information sur la direction de haut en bas. Quand la température s'abaisse encore au-dessous de zéro, il y a une autre symétrie qui se brise, menant à une autre transition de phase d'eau, une nouvelle transformation, la cristallisation… La brisure de symétrie est accompagnée de nouveau d'une augmentation d'organisation et d'information. Cette métaphore est réemployée par des auteurs modernes.[31]

Cela signifie, en réalité, que la matière, pour qu'elle fasse sens, a besoin d'une rupture de symétrie qui engendre bel et bien le non-équilibre. C'est pourquoi Prigogine affirme qu'à l'équilibre la matière est aveugle, c'est-à-dire que rien ne s'y passe. Mais, loin de l'équilibre, elle commence à voir. C'est ce qu'on peut lire : « *« La matière est aveugle à l'équilibre là où la flèche du temps ne se manifeste pas, mais lorsqu'elle se manifeste loin de l'équilibre, la matière commence à voir.»* [32]Il est donc vrai, selon cette approche, que la matière est instable et que le réel se déploie dans une logique d'évolutive à symétrie brisée. C'est ce déséquilibre qui est à l'origine du chaos ou du désordre. La question que nous nous posons dès lors est de savoir justement qu'est-ce que le chaos ? Au regard de nos observations précédentes, nous notons certaines structures présentent une organisation et une harmonie impeccables tandis que d'autres se désintègrent. A partir d'une approche synthétique, nous dirions plutôt que la matière ne saurait être dans un désordre total. Il y a un principe d'ordre qui la structure sans qu'elle soit en ordre. A ce niveau, nous pouvons faire recours à Prigogine qui conclut *La fin des certitudes* en faisant savoir, à propos du chaos, que la loi n'a pas disparu mais elle se donne dans une complexité qui éloigne l'idée de toute prédiction. Il affirme que « *les lois physiques sont associées à l'instabilité. »*[33] Nous pouvons également nous appuyer sur Jacques Monod dans *Hasard et nécessité* qui parle de Hasard essentiel pour exprimer des chaînes de déterminisme qui donnent lieu à un Hasard essentiel qui est la conséquence de la rencontre de lois déterministes dans un environnement complexe[34]. L'évolution future d'un pareil système échappe à l'observateur bien que le système soit régi par des lois déterministes, le problème étant qu'elles sont enchevêtrées. L'instabilité voire le chaos n'est donc pas absolu ; la loi reste présente à quelque chose près. Car si le déséquilibre, l'instabilité, la non-intégrabilité voire le désordre étaient absolus, l'entropie serait généralisée ; la matière n'aurait même pas eu le temps de se former. Les particules élémentaires seraient dispersées les unes des autres. C'est dans cette mesure que beaucoup de

[31]Stonier, T., *Information and the Internal Structure of the Universe*.New York: Springer-Verlag, 1990, *Ibidem*
[32]Ilya Prigogine, *La fin des certitudes*, Odile Jacob, Paris, 2001, p.12.
[33]Ilya Prigogine, *La fin des certitudes*, Odile Jacob, Paris, 2001, *Op.cit.*, p.228
[34] Jacques Monod, *Hasard et nécessité. Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*, éditions du Seuil, Paris, 1970, p 127-128.

penseurs appréhendent le chaos dans une perspective d'ordre et de désordre pour dire la beauté du réel. C'est ce que nous disions dans une recherche antérieure, parlant de Prigogine qui développe une complexité originale. Nous affirmions :

> Par ailleurs, Prigogine développe une épistémologie de la complexité qui est originale : il s'agit de l'écriture d'une nouvelle complexité qui ne signifie pas "qui est tissé ou composé" mais qui signifie harmonie de l'ordre et du désordre pour dire la beauté du réel. Ainsi, le désordre ou le chaos n'est plus quelque chose de négatif mais une composante de la matière qui s'allie à l'ordre. Le chaos est donc l'harmonie de l'ordre et du désordre.[35]

La thermodynamique des processus de non-équilibre, en intégrant le chaos, vient mettre, de ce fait, l'irrégularité dans la régularité, le désordre dans l'ordre. C'est ce que dit Tring Xuan Thuang quand il présente le chaos comme une discipline qui s'est beaucoup développée ces dernières années. Elle est venue balayer du revers de la main toutes les certitudes qui entouraient la forteresse de la dynamique classique et de la mécanique quantique, lesquelles faisaient de l'univers une machine fonctionnant automatiquement. Dans ce sens, Tring Xuan Thuang affirme que *« La théorie du chaos a mis l'irrégularité dans la régularité, du désordre dans l'ordre. »*[36]C'est cet état d'ordre et de désordre qu'on appelle le chaos déterministe qui est en fait un oxymore qui sous-entend qu'il y a une part de désordre et, en même temps, une part d'ordre.

Cela dit, si l'ordre et le désordre coexistent dans la matière physique en général, cela signifie que l'entropie peut croître et décroître selon que le système tend vers l'ordre ou vers le désordre.

Premier cas de figure : pour les systèmes isolés qui présentent des barrières adiabatiques, c'est-à-dire qui n'effectuent pas d'échanges avec l'extérieur, ils se trouvent généralement dans un état de désordre sous deux approches, l'une croissante et l'autre décroissante :

- Approche croissante : l'entropie croît progressivement et irréversiblement vers le seuil de saturation encore appelé l'entropie maximale. A ce niveau, il ne se passe plus rien, car toute l'énergie contenue dans le système est complètement dissoute. Mais, avant d'y arriver son désordre et son déséquilibre seront croissants jusqu'à ce seuil maximal.
- Approche décroissante : sans être en équilibre, le système frôle l'équilibre ou passe régulièrement à côté de l'équilibre grâce aux fluctuations qui réduisent la production

[35]Jospin Brice FOE, *De la dynamique classique à la thermodynamique des processus de non-équilibre : une ontologie de la nature à partir de la physique, Op.Cit.* p. 7.
[36]Tring Xuan Thuang, *Le chaos et l'harmonie, la fabrication du réel,* Gallimard, Paris, 2000, p. 105.

d'entropie. A ce niveau, on parle de la thermodynamique des processus proches de l'équilibre. Dans ce cas, le système est très proche d'être en ordre sans toutefois y parvenir. L'entropie aura tendance à décroître légèrement.

Cette analyse permet de comprendre que le désordre est une situation macroscopiquement probable d'u système isolé donné, car il peut augmenter son entropie jusqu'au seuil maximal ; il peut également la réduire grâce aux fluctuations internes du système.

Deuxième cas de figure concerne les systèmes ouverts : ici on observe que la seconde possibilité pour la nature est de rester en équilibre thermodynamique avec le milieu extérieur, car l'équilibre thermodynamique se réalise avec un système ouvert qui équilibre ses variables extensives et intensives avec son environnement. Dans ce cas, son entropie croît jusqu'au seuil maximal $S= 0$. Le système est en parfait équilibre avec son environnement. On observe une situation que le système est ordonné.

Il peut aussi arriver qu'on veuille faire chuter la température d'un système au seuil le plus minimal envisagé en physique appelé le zéro absolu de l'ordre de -273, 16 ^{o} C. La structure tend à l'équilibre absolu voire l'ordre absolu. La structure devient cristalline et les particules ne vibrent plus : elle tend alors vers l'ordre absolu à mesure que l'on s'approche du zéro absolu (0 Kelvin ou -273,15^{o} Celsius). Ici l'entropie serait nulle $S = 0^{-}$. Nous y reviendrons plus tard pour parler du troisième principe de thermodynamique ou principe de Nernst.

Fort de toute cette complexité dans la dichotomie ordre/désordre, il est important de postuler une bidirectionnalité de l'entropie.

Si la croissance absolue de l'entropie peut poser des difficultés d'acceptation à partir de simples observations d'ordre empirique, en regardant la structuration et le fonctionnement de notre environnement, comme nous venons de le montrer, il revient à se demander si cela peut également poser des difficultés de formulation à partir des expériences de pensée faites dans le cadre de particules élémentaires qui constituent la matière. C'est l'objet de notre prochaine réflexion.

1.2.Analyse des comportements moléculaires

1.2.1. Du chaos à l'émergence de l'ordre

Nous avons parlé, au point précédent, du chaos déterministe comme un oxymore alliant des notions antithétiques de la science physique : d'une part, l'indéterminisme lié au chaos, et d'autre part, le déterminisme lié à l'ordre qui implique la prédiction des résultats sur la base des lois qui gouvernent les phénomènes physiques. Le chaos déterministe est donc un oxymore qui traduit le fait que les lois continuent d'exister dans le désordre. C'est ce qui ressort de l'analyse du système à l'échelle des particules élémentaires, atomiques ou subatomiques. Mais seulement, ces lois ne peuvent plus prédire les évènements autant qu'elles le font dans le monde macroscopique. Le chaos déterministe signifie, en revanche, que le chaos n'est pas si « chaotique » qu'on le croit. Il a des lois. Ilya Prigogine avait d'ailleurs consacré une bonne partie de son chef d'œuvre intitulé *La fin des certitudes* (dans un chapitre dont le titre est très révélateur : *les lois du chaos.*[37]), à montrer que le chaos est gouverné par des lois, et non pas par le hasard et la stochastique. Dans la même perspective, beaucoup de penseurs posent le chaos en termes d'enchevêtrement ordre-désordre. C'est ce qu'affirme Tring Xuan Thuang quand il dit que *« La théorie du chaos a mis l'irrégularité dans la régularité, le désordre dans l'ordre. »*[38]Toujours dans cette lancée, il poursuit en ajoutant que *« Le chaos ne signifie pas absence d'ordre, mais se rattache plutôt à la notion d'imprévisibilité, d'impossibilité de prévision à long terme ».*[39]

En effet, la physique doit la paternité de cette idée au savant Henri Poincaré qui est considéré comme celui qui a découvert le chaos déterministe en rédigeant un mémoire de Master lors d'un concours organisé par le roi d'Amsterdam sur le phénomène à *3 corps*. L'étude consistait à essayer de calculer et de prédire les trajectoires du système constitué du soleil, de la terre et de lune. Il constata malheureusement que le résultat était imprédictible. Il partit, en effet, de l'étude du système solaire (notamment de l'étude des trajectoires orbitales Soleil-Terre-Lune), pour démontrer, pour la première fois, le phénomène chaotique. Il pose que la gravité aurait beau obéir à des lois physiques, celle-ci engendre un phénomène chaotique, c'est-à-dire-dire un ensemble d'ordre et de désordre. C'est ce qu'on appellera *chaos déterministe.*

[37] Prigogine Ilya, *La fin des certitudes*, Odile Jacob, paris, 2001, p. 107.
[38]Tring Xuan, *Le chaos et l'harmonie, la fabrication du réel,Op.cit.*, p 105
[39]*Idem*p.110.

Il démontrera principalement deux choses, à savoir :

- Premièrement que les lois non linéaires de Newton finissent par engendrer des mouvements chaotiques.
- Deuxièmement qu'un mouvement chaotique peut paraître stable durant des centaines de millions d'années avant de constater qu'il était chaotique et qu'il peut sortir de son îlot de stabilité.

Le mouvement à *3 corps* de Poincaré ne pouvait engendrer que des possibilités innombrables et des imprédictibilités au lieu des résultats déterministes attendus. Poincaré comprit que ce n'était point du tout une faiblesse de sa part, mais une propriété même de la nature. Le *théorème à 3 corps* forme donc ce qu'on appelle un système non-intégrable ou instable. C'est en l'amplifiant que l'on aboutit au chaos déterministe. Le chaos déterministe est donc une situation de milliards de milliards de particules formant un système qui, au final, ne peut être qu'instable ou non-intégrable bien qu'il soit régi par des lois déterministes.

Cela dit, notre expérience de pensée sera basée sur un système isolé à l'état de chaos déterministe, c'est-à-dire constitué d'une population de N particules dont on suppose le chiffre exponentiel. Supposons que le système est un milieu aqueux, et qu'on laisse celui-ci au repos, c'est-à-dire sans augmenter ni sa température, ni sa pression. On va remarquer, à l'échelle microscopique que, les particules ont tendance à se regrouper plutôt que de se trouver dans un état dispersé. A l'échelle macroscopique, cette situation correspond à un moment où le système est presqu'au repos. Au niveau microscopique, bien que les particules continuent de bouger, elles vont considérablement ralentir leur mouvement au fur et à mesure que le temps passe en absence de toute agitation des particules ou de chauffage. En effet, les particules continueront quand même de bouger[40] malgré ce ralentissement progressif de leurs mouvements, et cela est dû à l'équilibre des pressions à l'intérieur de l'enceinte. Mais, plus le temps passera, le mouvement sera de moins en moins perceptible. Les particules auront tendance à se retrouver dans des positions proches les unes des autres plutôt que d'être dispersées ou de s'entrechoquer. Cette situation est la plus probable de se produire à l'échelle microscopique. Cet état de choses qui

[40] Elles continuent de bouger parce que le système est un système dynamique instable comme nous le montre le théorème à *3 corps* de Poincaré qui engendre des récurrences dites de Poincaré en vertu desquelles le système va rester dynamique car les particules vont repasser N fois au cours du temps aussi près de leurs conditions initiales sans pouvoir toutefois l'atteindre. Car les récurrences engendrent de légères déviations imperceptibles mais déterminantes qui aboutissent à l'ignorance de l'évolution futur du système par un observateur extérieur.

correspond à une sorte de repos à l'échelle macroscopique, et à une réduction des vitesses et des interactions de particules entre elles et contre les parois à l'échelle microscopique, exprime une baisse d'entropie. De façon spontanée, le chaos déterminisme a tendance, en l'absence de perturbation et d'agitation, de faire passer la matière à l'assemblage de ses constituants élémentaires. On dit alors que la matière passe de l'équilibre à proximité à l'équilibre ou à l'éloignement de thermodynamique, selon les cas de figure. Car, le statut réel de la matière est d'être hors d'équilibre au niveau microscopique. Et comme nous l'avons souligné, l'état d'équilibre est un état exceptionnel parfois artificiel voire fictif dans beaucoup de cas : la matière étant toujours ou presque hors de l'équilibre (proche ou éloignée). Nous verrons plus tard comment les fluctuations internes, les frottements et les frictions (pour les systèmes isolés), les dissipations d'énergie, les perturbations venant de l'environnement(dans un système ouvert ou fermé) peuvent faire décroître l'entropie. Nous le disions déjà dans une recherche antérieure que :

> Les situations non chaotiques sont rares. Le chaos et la non-intégrabilité sont la règle et non plus l'exception. Les systèmes qui sont régis par l'ordre, la stabilité et l'équilibre sont des situations simplement artificielles et contrôlées. La vie se déroule loin de l'équilibre, où ordre et désordre se joignent pour dire la beauté du réel et raconter l'histoire du temps.[41]

La thermodynamique des processus de non-équilibre implique donc l'oscillement de la matière entre la proximité à l'équilibre et l'éloignement de l'équilibre thermodynamique. Nous verrons plus loin que ces processus de non-équilibre entre proximité et éloignement qui sont les plus récentes découvertes en thermodynamiques, ont donné une grande impulsion à la physico-chimie[42], grâce aux phénomènes étranges qui s'y produisent, notamment les phénomènes dissipatifs, réduisant considérablement l'entropie du système comme nous le montrent les travaux d'Ilya Prigogine. A ce moment, le rôle des fluctuations est déterminant pour faire jaillir l'ordre en réduisant l'entropie du système. Ilya Prigogine et Lefever affirment : « *Therefore, in contrast with the ordering principles of equilibrium based on the classical potential, we may say that far from equilibrium there prevails a type of order that we have called order through fluctuations*

[41]Jospin Brice FOE, *De la dynamique classique à la thermodynamique des processus de non-équilibre : une ontologie de la nature à partir de la physique, chez Ilya Prigogine*, *Op.Cit.* p.131.

[42] La physico-chimie est une science des particules élémentaires à la lisière de la physique et de la chimie. Elle étudie les liaisons chimiques des particules physiques dans ce cas, on l'appelle chez les anglo-saxons où elle a connu un essor rapide chemical physics. A ce niveau de recherche, les deux sciences fondamentales de la matière que sont la physique et chimie se joignent pour maîtriser le réel dans sa dynamique d'une part et dans ses liaisons d'autre part.

and whose description would require a new extension of chemical physics.»[43]Cela signifie que, dans les systèmes ouverts loin de l'équilibre, les fluctuations jouent, loin de l'équilibre, un rôle qui confère au système un comportement similaire à un état ordonné et équilibré d'ordre et d'harmonie. Rodriguez dans l'étude sur l'auto-organisation en thermodynamique affirme que *« cette idée d'un ‟ordre par les fluctuations" souligne comment un état hautement improbable d'un point de vue combinatoire (donc dans un système à l'équilibre) peut s'établir dans un système éloigné de l'équilibre. »*[44]Cela souligne comment du chaos déterministe qui est un état de désordre moléculaire, la nature finit par trouver la voie de l'ordre. Ainsi, l'ordre jaillit du chaos, et la matière commence à se structurer. Prigogine nous le fait bien savoir dans un livre dont le titre est déjà à lui seul très révélateur : *Order out of chaos*. Pourquoi ces particules vont-elles progressivement s'auto-assembler ? Cela est dû aux liaisons chimiques qui vont progressivement s'établir entre les différentes particules physiques dans la situation de proximité à l'équilibre. C'est à ce niveau que qu'entre en scène l'explication physico-chimique pour rendre compte des liaisons chimiques des particules physique grâce aux fluctuations d'énergie dans le système. C'est ce que nous fait savoir Maurice Letort dans un ouvrage collectif intitulé *Physique et Chimie* où il traite particulièrement de la partie intitulée chimie physique. Il affirme que :

> Il n'y a pas de phénomène chimique qui ne soit accompagné de phénomène physique. Ainsi une réaction chimique aura toujours des effets thermiques…Il était tout à fait naturel que la chimie, ayant ouvert, vous le savez, la voie royale, du discontinu aux physiciens, en retour, les physiciens apportent à la Chimie les théories, les réflexions fondamentales, permettant aux chimistes d'expliquer les phénomènes qu'ils étudient. Cette interprétation des phénomènes chimiques par la Physique théorique constitue ce que les Américains appellent « Chemical Physics » et les Russes « physique Chimique ».[45]

Cela dit, l'approche à l'équilibre va donc engendrer des liaisons chimiques des particules contenues dans le système. Ces liaisons expliquent l'assemblage de la matière. Au fur et à mesure que le système s'éloignera de l'équilibre, cet assemblage de particules élémentaires sera de plus en plus important, pouvant donner lieu à des traces de matière visibles à l'échelle macroscopique,

[43]Ilya Prigogine et René Lefever,*Stability and Self-Organization in Open Systems*, in *Advances in Chemical Physics*, vol. 29: *Membranes, Dissipative Structures and Evolution*, p. 18

[44] Quentin Rodriguez, *Thermodynamique et auto-organisation dans les sciences physiques Étude de la genèse du concept d'auto-organisation chez Ilya Prigogine (1945-1975)*, (mémoire de recherche), Université Paris-VII Diderot, 2016, p. 79.

[45]Maurice Letort (du Centre International de synthèse), *La chimie physique. Acquisitions récentes et tendances actuelles en physique et chimie*, Aubier-Montaigne, Paris, 1968, p 155.

si ce nombre de particules est important pour pouvoir atteindre des moles[46]. Les particules vont donc s'agglutiner au point de former des macrostructures possiblement visibles à l'œil nu si leur nombre est assez élevé. Car, la mole qui correspond au nombre d'Avogadro est une quantification internationale qui permet de passer de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique. Un dépôt d'une matière solide à l'état organisé sera observable attestant que l'ordre a jailli du désordre initial. Cela n'est possible que parce la matière s'est écartée de l'équilibre où la matière est absurde, car tout y est symétrique, isotrope et homogène, pour se retrouver hors de l'équilibre où elle fait jaillir de belles structures organisées. Donc, en absence de perturbation et d'agitation moléculaire d'un système, la matière tend naturellement à s'éloigner de l'équilibre pour trouver l'ordre et l'harmonie. Cela dit, à partir de cet exemple de pensée, un système aqueux contenant de l'eau pure donnera lieu à un dépôt sous forme de trace matérielle visible à notre échelle après un certain temps. Car, pour un centimètre ($1cm_3$) d'eau pure, le nombre d'Avogadro est relativement de NA : $6.02X10^{23}$ qui correspond à une mole (une quantité de matière manipulable à notre échelle). Si on augmente le volume V de cette eau, le nombre d'Avogadro va également augmenter. Au bout d'un temps, très long peut-être, si le système ne connait pas d'agitation, les particules vont s'auto-assembler sous forme de matière macroscopique pouvant être détectée à notre échelle. C'est ainsi que la première matière prébiotique s'est d'ailleurs constituée dans l'atmosphère primitive précambrienne d'après l'expérience de Miller et Urey qui remportèrent d'ailleurs un prix Nobel grâce à cette explication de l'assemblage des premiers éléments de l'océan primitif de la Terre. Nous y reviendrons au chapitre 9.1.3.

Toutes choses égales, nous pouvons voir que la matière tend toujours à s'organiser. Or, si elle recherche naturellement un retour à l'ordre à la suite d'un désordre (accélération des particules, leurs interactions réciproques, leurs interactions avec les parois), cela implique que, de façon naturelle, les systèmes thermodynamiques évitent l'entropie. Même lorsqu'ils parviennent, ils tentent de s'éloigner pour rester, soit proche de son maximum, soit alors loin de celui-ci. On peut donc dire, à partir de cette expérience de pensée, que l'entropie ne croît peut-être qu'accidentellement lorsque qu'il y a agitation moléculaire ou perturbation de l'ordre naturel

[46]La mole nous permet de passer de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique. Une mole vaut $6,02x10^{23}$N, ce qui correspond au nombre d'Avogadro. C'est une quantité suffisante de particules élémentaires pouvant être perçues à l'œil nu.

dans un système considéré, pour décroître ensuite dès que la perturbation ou l'agitation moléculaire cesse.

1.2.2. De la proximité et de l'éloignement de l'équilibre : apories d'une entropie maximale

L'exemple de pensée que nous avons réalisé plus haut nous a montré que le chaos déterministe finit souvent par faire jaillir l'ordre, en l'absence d'agitation thermique ou de perturbation. En d'autres termes, il finit par faire diminuer naturellement l'entropie quand on laisse la nature s'exprimer. Cet aspect des choses qui fait loi dans le monde microscopique, montre que le sort de la matière dans les système ouverts est d'être condamnée à balancer entre être proche de l'équilibre et d'en être éloignée, grâce aux *effets aux bords du système,* c'est-à-dire *aux échanges effectués au niveau des parois* avec l'environnement extérieur, sous-entendu qu'elle est très souvent en déséquilibre comme nous avons déjà eu à le montrer lorsque nous affirmions dans une précédente recherche: *« La nature toute entière est un système thermodynamique de non-équilibre. La situation d'équilibre est une situation exceptionnelle ; c'est le non-équilibre, qui est la règle. Nous sommes nés du non-équilibre et nous vivons du non-équilibre et dans le non-équilibre. Le non-équilibre est l'âme de la réalité physique. »*[47] Donc, si la nature est presque toujours en déséquilibre microscopique, sauf dans les cas de *coarse description*[48], c'est-à-dire, où on tient compte uniquement du macro-état le plus probable, situation où toutes les variables d'état intensives sont équivalentes dans tout le système. Mais, c'est le niveau microscopique qui nous intéresse ici. A ce niveau, on réalise que le destin de la nature physique se joue donc entre deux positions de non-équilibre : la proximité de l'équilibre et l'éloignement de l'équilibre. Les deux, à savoir : la proximité et l'éloignement de l'équilibre correspondent à la décroissance de l'entropie (pour la proximité de l'équilibre), suivie de l'amplification de cette décroissance (pour l'éloignement de l'équilibre). Ces deux situations sont, bel et bien, observables à l'échelle microscopique dans les trois cas de figure les plus significatifs des systèmes thermodynamiques, à savoir les systèmes : ouverts, fermés et isolés.

[47] Jospin Brice FOE, *De la dynamique classique à la thermodynamique des processus de non-équilibre : une ontologie de la nature à partir de la physique, chez Ilya Prigogine* (mémoire), 2020, *Op. Cit.* p. 133.

[48] Selon Ilya Prigogine, la *coarse description* de la matière renvoie à une description à l'échelle macroscopique ou encore une description brute. On tient uniquement compte du macro-état le plus probable de se réaliser lors de l'expérience. Elle est opposée à la subtile description qui considère l'état microscopique réel du système.

Dans les systèmes ouverts comme nous l'avons montré, la proximité de l'équilibre se fait grâce aux forces et aux fluctuations venant de l'environnement qui engendrent des dissipations d'énergie contribuant à rejeter dans l'environnement une partie du maximum entropique. Dans la thermodynamique des processus de non-équilibre, la proximité à l'équilibre est donc une situation où le maximum entropique est réduit par le rejet d'une partie de l'énergie interne (chaleur, travail) hors du système avec pour résultat une réduction entropique. Le système passe à la limite de l'équilibre sans toutefois y parvenir. Bien que les variables intensives relevant de la description macroscopique (pression, température) soient également distribuées dans l'ensemble du système au seuil d'entropie maximale, les particules continuent de se mouvoir au niveau microscopique démontrant, en fait que l'entropie maximale n'est qu'une *coarse description*, une description grossière relevant du niveau macroscopique. Il y a donc une réduction entropique au niveau microscopique à cause du fait que le système tend vers l'équilibre sans y parvenir, faisant ainsi réduire faiblement l'entropie. Le maximum entropique devient donc une *coarse description*, c'est-dire une description grossière du système au niveau macroscopique où tout semble au repos et pourtant, ce n'est jamais le cas au niveau microscopique.

Les processus d'éloignement de l'équilibre, eux, amplifient cette diminution entropique et engendrent des comportements ordonnés et harmonieux. Nous pouvons retenir que, théoriquement, par une expérience de pensée, la thermodynamique des processus de non équilibre rompt avec l'ordre qui règne à l'équilibre pour promouvoir une thermodynamique de non-équilibre, en créant, par ailleurs, des situations analogues à l'état d'équilibre grâce aux effets aux bords du système, à savoir les dissipations d'énergie, qui y ont lieu.

En effet, dans l'état d'équilibre qui est un état d'entropie maximale, puisque le système cesse d'évoluer (puisqu'il a atteint une entropie maximale, on note un ralentissement des vitesses, causant une diminution des interactions de particules, toutes chosent qui traduisent une disparition de l'énergie potentielle transformée en énergie cinétique incapable de créer du mouvement. Le système alors symétrique et identique, et de petites corrélations de particules apparaissent. D'où une sorte d'ordre à l'équilibre. C'est pourquoi, on dit qu'à l'éloignement de l'équilibre le système présente des comportements analogues à ceux qu'on retrouve dans la situation d'équilibre. Mais les dissipations vont créer la rupture de symétrie. Ces dissipations d'énergie créent, dans un premier temps, une situation de proximité de l'équilibre, par réduction

de l'entropie maximale grâce à des petits écarts de l'équilibre dues aux énergies non conservatives des forces mécaniques : frottement, frictions des particules etc. Ensuite, elles permettent à l'entropie de décroître drastiquement grâce de l'éloignement de l'équilibre qui est causé par les fluctuations, augmentant de plus en plus l'écart à l'équilibre et engendrant, du même coup, des phénomènes dissipatifs qui montrent que le système se trouve dans un état plus ordonné. Michael Starzak nous fait comprendre que la plupart des systèmes se retrouvent dans ses deux cas de figures où ils manifestent justement ordre et organisation :

> However, the majority of systems are neither at or near equilibrium. Far from equilibrium, new phenomena require a more global examination of the roles of energy and organization. Far from equilibrium, a system might settle into a meta-stable equilibrium maintained by a flow of energy or particles. Far from equilibrium, a homogeneous system might spontaneously order. Reactive systems oscillate through metastable states without coming to a single stable equilibrium[49].

En d'autres termes, dans la plupart des cas, un système se retrouve soit à l'équilibre (situation description macroscopique), soit près ou alors loin de l'équilibre (situation microscopique) où il apparaîtra, dans le non-équilibre, une sorte de méta-équilibre maintenue par les fluctuations et plus tard apparaîtra une auto-organisation de la matière. Au niveau microscopique, nous pouvons donc retenir deux comportements des systèmes ouverts : la proximité et l'éloignement de l'équilibre.

Les systèmes thermodynamiques caractérisés par les situations dites d'éloignement de l'équilibre présentent des situations qu'on aurait eues dans le cas d'un équilibre microscopique. L'équilibre macroscopique n'étant qu'une *coarse description* de la matière, c'est-à-dire une description grossière à l'échelle macroscopique. En d'autres termes, l'équilibre thermodynamique prétendue dans le maximum entropique et qui repose sur un équilibre des variables intensives n'est qu'une description du système à notre échelle. Mais à l'échelle microscopique, les particules continuent de bouger. Grégoire Nicolis et Prigogine affirment que :

> La notion d'équilibre thermodynamique est la rupture avec la notion d'équilibre mécanique présentée [comme un état particulier dans lequel à la fois les vitesses et les accélérations des points matériels sont égales à zéro[50]]. Contrairement à ce qui se passe dans l'équilibre mécanique, les molécules dont est fait le système, sujettes à des forces qui ne sont pas compensées, se meuvent dans toutes les directions possibles. Cette agitation décroît avec la température. L'équilibre se rapporte ici à un nombre de propriétés collectives qui caractérisent

[49]Michael E. Starzak, *Energy and Entropy. Equilibrium to Stationary States*, Springer, New York, 2010, p 275.
[50]Grégoris Nicolis et Ilya Prigogine, *A la rencontre du complexe, Op.Cit.* p. 72.

> le système dans son ensemble, telle que la température, la pression ou la concentration d'un composé chimique[51].

Dans cette citation, il apparaît que les variables d'état qui sont prises en compte dans la détermination de la notion d'équilibre sont, bel et bien, des variables macroscopiques d'état qui traduisent un comportement microscopique collectif de milliards de milliards de particules. Car, en effet la pression c'est la description macroscopique de la fréquence des collisions des particules avec les parois du système, la chaleur quant à elle est la description macroscopique des interactions des particules entre elles. C'est ainsi que Rachida Ouargli-Saker affirme que *« La température est reliée au degré d'agitation moléculaire de la matière. Si la vitesse* $\boldsymbol{V_i}$ *des molécules, c'est-à-dire, leur énergie cinétique* $\boldsymbol{E_i}$ *augmentent, alors le degré d'agitation thermique du milieu est plus grand. »*[52]Il poursuit, quant à la pression, en disant que *« la pression est due aux nombreux chocs des atomes ou molécules de la matière sur les parois du récipient »*[53]

L'équilibre microscopique parfait coïnciderait avec le minimum entropique universel qui postule une entropie zéro à la température 0 Kelvin, qui est impossible à atteindre du moins pour le moment en physique. On suppose alors que, dans un pareil système thermodynamique, les particules seraient absolument immobiles, et que l'ordre et l'harmonie seraient implacables et impeccables. Un pareil système est une idéalisation théorique. Ainsi que l'entend Nick Connor :

> L'entropie d'un système se rapproche d'une valeur constante lorsque la température approche du zéro absolu. Sur la base de preuves empiriques, cette loi stipule que l'entropie d'une substance cristalline pure est nulle au zéro absolu de la température, 0 K et qu'il est impossible, par quelques procédés que ce soit, idéalisé, de réduire la température d'un système au zéro absolu en un nombre fini d'étapes.[54]

Cela dit, plus on s'éloigne du maximum entropique $S > 0$, plus l'entropie diminue. A défaut d'atteindre le zéro absolu, on se contente la proximité voire l'éloignement de l'équilibre. Ces états permettent à la matière de réduire son entropie. L'éloignement à l'équilibre permet donc à la matière de s'auto-organiser. Et plus on s'éloigne de cet équilibre pour tendre vers le zéro absolu, plus l'ordre et l'organisation s'amplifient, car les particules bougent moins. En d'autres termes, puisque l'état d'équilibre avec production du maximum entropique n'est qu'une illusion

---

[51]*Ibidem*

[52]Rachida Ouargli-Saker, *Cours de thermodynamique*, Université des Sciences et de la Technologie D'Oran « Mohamed BOUDIAF » Faculté de Chimie Département de Génie des Matériaux, in www.univ.usto.dz, p.2

[53]*Idem*, p.3

[54] Nick Connor, « *Qu'est-ce que le zéro absolu ? - Température - Définition »* in *thermal-ingenieering/org/fr/* posté le 22 mai 2019.

macroscopique (*coarse description*), et que, par ailleurs, l'état d'équilibre parfait avec production du minimum entropique au zéro absolu en est une autre, la matière reste donc coincée entre l'approche à l'équilibre et l'éloignement de l'équilibre qui font baisser son entropie au lieu de la faire croître. Cela tient pour les systèmes dits ouverts.

Le même phénomène s'observe dans les systèmes fermés dont les frontières sont diathermes, c'est-à-dire qu'ils permettent un échange de chaleur ou d'énergie avec l'extérieur, mais on notera que cela se fera avec moins d'accentuation que dans les systèmes ouverts qui échangent, la matière, en plus de la chaleur ou de l'énergie, avec l'environnement.

Par contre, dans les systèmes isolés, à savoir : ceux qui n'ont pas la possibilité de réduire leur entropie à cause de leurs frontières adiabatiques, c'est-à-dire, qui ne permettent aucun échange avec l'environnement, on observe que leur entropie croit progressivement jusqu'à l'atteinte du maximum entropique, selon le second principe de thermodynamique. C'est de cela que parlait Boltzmann et les autres thermodynamiciens classiques quand ils définissaient l'entropie dans le second principe de thermodynamique comme une grandeur toujours croissante. Et d'après Boltzmann, sur la base de son fameux le théorème H, une *antithermodynamique* qui renverserait la thermodynamique, pour faire revenir le système à l'état initial faisant décroître l'entropie, était impossible. La fonction issue du théorème H ne pouvait que se comporter de façon à montrer que l'entropie croissait essentiellement, comme nous pouvons lire par la plume de Francisco Balibrea:

> Boltzmann succeeded in proving second Law of thermodynamics using only principles of Mechanics. In fact, such paper was the starting of statistical Physics. I contained two important innovations; by one hand, the introduction of the currently known as the Boltzmann equation which models the behavior of a gas in different situations; on other hand, his fisrt proof of second is a consequence of the atomic theory of matter and probability and it is known as H theorem…This Boltzmann's H theorem proves the second Law of thermodynamics, meaning that physical entropy of an isolated system does not decrease with time[55].

Selon Francisco Balibrea, le modèle thermodynamique de Boltzmann qui est un modèle basé sur la distribution des vitesses dans un volume fini contenant du gaz, a contribué à cristalliser le second principe de thermodynamique en faveur de la croissance entropique. Cette croissance entropique, selon Prigogine, est le langage des processus thermodynamiques qui se manifestent dans les systèmes qui tendent vers l'équilibre (sous-entendu le maximum

[55] Francis Balibrea, *On Clausius, Boltzmann and Shannon Notions of entropy* in *Journal of modern physics*, No 219-227, January, 2016.

entropique). Et ce phénomène s'observe dans le système isolé où il n'y a pas de possibilité d'échange de matière, de chaleur ni de travail avec l'environnement. Selon les prévisions de Boltzmann, le système est condamné à la mort thermique. Nous verrons, par contre, que tous ces systèmes ne courent pas vers la mort thermique. Nous allons capitaliser cette expérience pour l'inférer à l'univers souvent considéré comme un système isolé, afin de reconsidérer l'évolution ou le comportement de son entropie, à partir de la possible décroissance entropique dans les systèmes isolés. Cela étant Ludwig Boltzmann a commis quelques erreurs, à savoir : appliquer ses expériences sur l'entropie des gaz dans les systèmes isolés à l'univers tout entier pour déduire que celui-ci court vers la mort thermique ou vers l'entropie maximale alors que l'univers n'est pas un milieu essentiellement gazeux ; il est plutôt constitué de plusieurs phases. De plus, il faut revoir le type de système auquel il appartient. C'est l'erreur du physicien autrichien Boltzmann :

> Au XIXe siècle, une découverte a glacé d'effroi plusieurs physiciens et philosophes : sans un système isolé, la croissance de l'entropie est inéluctable. L'entropie est une mesure du degré de désordre d'un système et la disponibilité de l'énergie qu'il contient pour effectuer du travail, par exemple maintenir un organisme. Son inexorable augmentation implique donc que l'univers entier devait un jour finir dans la décrépitude. C'est le fameux spectre de la mort thermique. Cette conclusion conduisait celui qui est probablement le grand philosophe occidental du XXe siècle, Bertrand Rusell, à un pessimisme radical quant au destin du cosmos.[56]

Ce même pessimisme qui a caractérisé Bertrand Russell, a également caractérisé le thermodynamicien Boltzmann dans sa cristallisation du second principe, comme nous venons de le montrer, au point de se suicider à cause de l'angoisse que l'univers courait vers la mort thermique ; comme le raconte Eric Johnson : *« But Boltzmann had already lived more days than he could bear. And though he had planned to return to Vienna the following day, he decided that he would rather kill himself instead. Boltzmann set about the task of committing suicide. He was a kind man with a generous mind. This is his story and the story of his second law. »*[57]Il s'agit là du récit de son suicide à partir du fait que le second principe, dans les systèmes isolés, présentait une évolution entropique croissante. Ce qui était un mauvais message pour les systèmes thermodynamiques, et surtout l'univers comme système.

Mais aujourd'hui, nous estimons que Boltzmann a péché par généralisation de ce second principe. La première erreur est que ce dernier n'a pas tenu compte des différences de phases

[56]Laurent Sacco, *L'entropie de l'univers-son désordre-revue à la hausse* consultée dans *www.futura.sciences.com/sciences/actualité/astronomie*

[57]Eric Johnson, *Anxiety and the Equation.Understanding Boltzmann's entropy*. The MIT Press, Massachusetts, 2018, p.2.

possibles dans les différents systèmes thermodynamiques. D'une phase à une autre, le comportement entropique n'est pas le même. Ayant travaillé particulièrement sur l'entropie des gaz, sa conclusion sur la croissance inéluctable de l'entropique était une erreur. Comme le montre le théorème H qui est une démonstration de l'impossibilité de renverser une évolution thermodynamique ainsi que de faire décroître l'entropie du système mis en place, le second principe s'applique parfaitement avec les gaz uniquement.

Cela dit, dans un milieu non gazeux ou caractérisé par les changements de phase et d'autres contraintes physiques que nous allons définir plus tard, le second principe pourrait bien ne pas fonctionner même dans un système conservatif, sous-entendu un système qui n'échange pas avec son environnement et qui conserve son énergie. Cela donnerait raison à la thèse de la croissance entropique dans certains systèmes isolés. Il s'agit donc dans le prochain point de voir comment les forces de frottements, les fluctuations d'énergie finissent par réduire la croissance de l'entropie dans un système isolé.

1.2.3. Des dissipations et de la non-conservation des énergies et leurs implications

Une fois de plus, nous allons encore procéder par les expériences de pensée pour montrer que l'entropie peut décroitre dans les systèmes isolés. Nous savons, par principe, que les systèmes isolés sont ceux qui n'effectuent pas d'échange de matière, de travail ou chaleur avec l'environnement et dont l'énergie se conserve sans se renouveler. Ces systèmes sont dits conservatifs par opposition aux systèmes ouverts qui sont dits dissipatifs. Ainsi, coupés de leur environnement, les systèmes isolés n'ont pas la possibilité de réduire leur entropie lorsqu'elle est maximale pour éviter au système de se retrouver dans la mort thermique où toute l'énergie potentielle se retrouve diffuse dans tout le système sous forme d'énergie cinétique incapable de maintenir une activité mécanique en tant que telle au sein du système. C'est sur cette base que fut énoncé le deuxième principe de thermodynamique qui décrit l'état entropique comme essentiellement croissant. Il affirme que, *pour tout système isolé, il existe une fonction des variables d'état, extensive, non conservative, telle que sa variation au cours d'une transformation élémentaire s'écrit :*

$dS = \delta S_{tr} + \delta S_{pr}$ avec $\delta S_{tr} = \frac{\delta Q}{T1}$

$\delta S_{pr} < 0$ pour une transformation irréversible ;

$\delta S_{pr} = 0$ pour une transformation réversible.

S est appelée ***entropie*** du système. Les autres notations sont les suivantes :

δS_{tr} : entropie reçue par le système, en provenance du milieu extérieur.

δS_{pr} : entropie produite (créée) à l'intérieur du système, lors de la transformation.

δQ : quantité de chaleur reçue par le système, en provenance du milieu extérieur.

T_f : température de la frontière du système.

Si la transformation est irréversible, elle conduit nécessairement à produire de l'entropie positive ($\delta S_{pr} > 0$). Dans le cas limite idéal d'une transformation réversible (que l'on sait impossible de se produire dans la réalité), la production d'entropie s'annule ($\delta S_{pr} = 0$). Enfin, une transformation qui aboutirait à une production d'entropie négative est impossible. C'est en cela que le deuxième principe est un principe d'évolution. Son application réelle nous dira si une transformation est possible ou pas, et dans quel sens elle se fera.

En résumé, l'entropie est créable (donc non conservative), mais indestructible. En pratique, toutes les transformations réelles sont irréversibles, et conduisent donc à créer de l'entropie.

Cela dit, par principe, l'entropie d'un système isolé ne peut que croître, car son entropie reçue est de l'ordre de zéro à cause de ses frontières qui sont adiabatiques. Il ne saurait y avoir que de l'entropie créée, c'est-à-dire celle qui se produit à l'intérieur du système.

Mais, il se pose un problème, celui de la prise en compte d'un certain nombre de paramètres, en dehors des variables d'état intensives que sont ici la température et la pression. Essayons de tenir compte des forces de frottements, des fluctuations et les déviations de l'énergie interne du système, ils aboutissent à un résultat qui modifie le second principe. A ce niveau, Yi-Fang fait une remarque intéressante:

> There is no doubt that the second law of thermodynamics is a great contribution to development of science, and applied widely many aspects. However, the basic principle is the statistical independence: the state of one subsystem does not affect the probabilities of various states of the other subsystem, because different subsystem maybe regarded as weakly interacting (landau, Lifsic and Pitaevskii, 1980). It shows that various interactions among these subsystems are not considered. Such preconditions of entropy increase are: 1) for isolated systems, which are only approximation; 2) various internal interactions in system must be neglected, they must be thermal equilibrium processes, thereby no phase transition. However, if these premises are regardless and unlimited extension to all the process in spite of its preconditions, it will be metamorphosed into belief divorced from reality and violated science. [58]

En effet, l'auteur pense que, pour qu'on puisse parler de croissance entropique dans un système isolé comme cela a été généralisé, il faut des préconditions que nous devons définir très rigoureusement. Cependant, si ces préconditions qui portent sur la simplification et la négligence d'un certain nombre de paramètres ne sont pas définies, la croissance sera déduite au-delà de la réalité des faits. Nous y reviendrons en montrant qu'un système isolé au sens strict n'existe pas en réalité. Mais, pour le moment, nous nous attaquons aux forces mécaniques qui opèrent dans les systèmes conservatifs pour montrer une possible décroissance de l'entropie dans les systèmes isolés, à partir du jeu des énergies.

Commençons par les forces de frottements. Par principe, nous savons que, dans un système thermodynamique, le mouvement des particules est la conséquence des forces mécaniques exercées dans ce système. En d'autres termes, il s'agit de la transformation de l'énergie potentielle de ce système en énergie cinétique, selon la loi de transformation des forces qui s'énonce comme suit : l'énergie mécanique (E_m) d'un système est une grandeur macroscopique, somme de son énergie cinétique (E_c) et de son énergie potentielle (E_p).

D'où **$Em (J) = Ec (J) + Ep (J)$.**

Dans un système isolé, la somme de ces deux forces est égale à zéro. Si nous essayons de mettre les expressions de l'équation précédente d'un seul côté, nous aurons : $Em = Ec (J) + Ep (J) = 0$. Cela est vérifié en vertu du principe de conservation d'énergie énoncé par le premier principe de thermodynamique : « *au cours d'une transformation, l'énergie n'est ni créée ni détruite : elle peut être convertie d'une force en une autre. Mais la quantité totale d'énergie se conserve.* » Ainsi, on peut lire dans les lignes du cours de physique sur la thermodynamique ce qui suit : *« la loi fondamentale et générale de la physique assure que l'énergie d'un système se*

[58]Yi Fang Chang, *Entropy decrease in isolated systems: theory, facts and test, Op. Cit*. p.16-24

conserve à condition de lui éviter tout échange avec le milieu extérieur : le système est alors isolé et son énergie totale est fixe et constante au cours du temps. Elle est dite conservative. »[59]Or, le deuxième principe de thermodynamique stipule que l'énergie potentielle dite concentrée doit complètement céder en énergie cinétique liée à la vitesse pour se retrouver complètement diffuse dans tout le système. L'entropie sera donc maximale à la fin du processus et le système va se retrouver dans un état d'équilibre thermodynamique caractérisé par un désordre maximal. Cette situation est d'après l'observation des données expérimentales une situation presque fictive car :

- Un système isolé, dans le sens rigoureux du terme n'existe pas. Il n'est qu'une approximation. En délimitant les frontières d'un système quel que soit le degré de précision, on approche du système isolé sans l'atteindre, comme le montre Yi-Fang dans la citation que nous venons de reprendre : *« such preconditions of entropy increase are : for an isolated systems, which are only approximation [etc.] »*[60] Le système isolé est donc une approximation et non une exactitude.
- On néglige certaines données telles que les frottements de l'air et les fluctuations du milieu traversé par les particules

En effet, les forces de frottements sont des forces non conservatives. Des forces non conservatives sont des forces qui transforment l'énergie initiale d'un système en une autre énergie finale. C'est ce que nous pouvons lire dans les colonnes de ce document de physique : *« Les forces de frottement sont des forces non conservatives : elles sont dites dissipatives. Avec les forces de frottement, une partie d l'énergie mécanique se transforme en chaleur. Il n'y a donc pas conservation de l'énergie mécanique. »*[61]Cela dit, la symétrie de transformation de l'énergie potentielle en énergie cinétique est brisée. Les forces de frottement, interagissant font créer une énergie thermique. La quantité totale d'énergie sera conservée, mais l'énergie mécanique sera dissipée pour donner lieu à l'énergie thermique. Cela dit, si le milieu est aqueux, la vitesse des particules va ralentir et la température du système va augmenter. Le système ne court donc pas vers une entropie maximale. Le mouvement mécanique est freiné au cours du temps, les particules auront tendance à ralentir, ce qui pourra favoriser les corrélations entre elles. Le système aura tendance à s'écarter de l'entropie maximale, en développant des microstructures

[59] Michel Pullicino, *Thermodynamique. Tout le cours*. Bibliothèques électroniques des classes préparatoires in http://prepa-book.forummaroc.net
[60]*Ibidem*
[61]*Conservation de l'énergie mécanique* in http:// resssources.unisciel.fr

organisées. Or, si des structures organisées (qui militent en faveur d'une réduction du désordre) apparaissent, cela prouve que l'entropie du système diminue au lieu de croître contrairement à ce que prévoit le second principe de thermodynamique. L'exemple de pensée est le phénomène des météorites venant de l'espace. Quand une météorite venant de l'espace entre en contact avec l'atmosphère terrestre, ce qui se passe est que la météorite (qui a habituellement une grande vitesse de l'ordre de 15 km/s à 30 km/s, représentant les vitesses cosmiques typiques à peu près 54 000km/h à 108 000km/h, ce qui représente une vitesse supersonique), perd considérablement sa vitesse en frappant l'atmosphère terrestre qui, grâce à la poussée d'Archimède liée à la densité de l'atmosphère traversée, essaie de la repousser vers le haut. Il se produit alors un échauffement dû au frottement de l'air comme en témoigne Celine Délurzarde dans un article publié dans la revue futura-science :

> Une étrange boule de feu a traversé le ciel australien, illuminant le ciel d'un flash lumineux de 90 secondes.Un phénomène lié à l'entrée dans l'atmosphère d'une météorite fonçant à une vitesse de 15km/s vers la surface terrestre… Lorsque d'une météorite pénètre dans l'atmosphère à grande vitesse, elle s'échauffe et brûle sous l'effet de frottement de l'air. Les plus petites se consument entièrement, mais celles qui ont une masse suffisante (généralement supérieure à plusieurs kilogrammes) atteignent la surface de la terre.[62]

En effet l'échauffement dépend du rapport masse-volume de la météorite, car la vitesse cinétique donnée dans la formule $\mathbf{1/2\ mv^2}$, montre que la vitesse dépend de la masse, donc du volume. Plus la masse est significative plus la résistance de l'air est importante, et plus l'échauffement a une grande portée. Tout ceci a un impact sur la vitesse : l'énergie cinétique liée à la vitesse sera transformée en énergie thermique manifestée par l'échauffement, d'où le ralentissement de la météorite observée dans la plupart des cas.

Ce phénomène montre bien que de différentes transformations énergétiques ont lieu dans un système. La conception boltzmannienne d'une prise en compte de la seule énergie mécanique pour en déduire une croissance entropique sans possibilité d'éviter la mort thermique semble une erreur. Dans un système isolé, ces frottements jouent un important rôle dans le comportement de l'entropie. Cela dit, les forces de frottements jouent le même rôle que les dissipations d'énergie dans les systèmes ouverts. Or, nous savons que ces dissipations sont à l'origine de la décroissance entropique. Nous pouvons lire par la plume d'Edith Saltiel que « *Le comportement des systèmes*

[62] Céline Deluzarche, « *Cet astéroïde qui a rebondi sur l'atmosphère terrestre fonce sur Jupiter* », posté dans futura-science le 07/04/2020 consulté dans www.futura-sciences.com

réels qui montre l'omniprésence des phénomènes dissipatifs conduit à la non conservation de l'énergie mécanique. Diverses situations où interviennent les frottements illustreront ces phénomènes. »[63]En d'autres termes, les frottements induisent les dissipations qui sont dues aux transformations d'énergie, spécialement l'énergie mécanique qui cède en énergie thermique. Ces phénomènes instaurent une logique nouvelle dans l'étude du comportement de l'entropie. Cela pourrait donc bien déjouer les prévisions du second principe de thermodynamique tel que prédit par les thermodynamiciens classiques. Les frottements remettent donc la réflexion au cœur du débat sur le comportement de l'entropie. En le disant, il s'agit une fois de plus de préparer l'argumentaire sur la possibilité de la décroissance des entropies locales dans l'univers considéré de façon consensuelle par la communauté scientifique comme un système isolé à entropie croissante. Ce qui pourrait nous amener à postuler, plus tard, une décroissance du désordre dans l'univers.

Un autre facteur devrait être également pris en compte. Il s'agit des fluctuations. La raison qui motive cette prise en compte de nouveaux facteurs tels que les frottements sus-évoqués (les fluctuations) est que le second principe de thermodynamique qui s'applique mieux avec les systèmes isolés est vrai parce qu'on a négligé certains facteurs. Quand on les prend en compte, il en ressort des situations cocasses que la loi boltzmanienne n'a pas prévues. Ainsi, les fluctuations qui caractérisent les situations de non-équilibre engendrent des événements spontanés imprévisibles qui peuvent déjouer les prévisions en termes d'évolution du système. En effet, les fluctuations sont définies comme *« des déviations générées d'une manière spontanée indépendamment de l'environnement […] Nous pouvons aisément comprendre que de tels événements se produisent essentiellement au hasard. »*[64]

Cela signifie que des systèmes isolés où se manifestent les processus de non-équilibre peuvent connaître des fluctuations internes indépendamment de l'influence de leur environnement. Ces événements qui relèvent purement du hasard, c'est-à-dire qu'elles sont inéluctablement imprévisibles, peuvent conduire le système vers une création d'entropie négative. De récentes études sur l'entropie le prouvent tel que le fameux théorème de fluctuation (FT). Ainsi, on peut lire dans ce document de physique que $\frac{\Pr\ (\Sigma=A)}{\Pr\ (\Sigma=-A)} = e^{At}$

[63] Edith Satltiel, « *Le principe de conservation de l'énergie et le théorème de l'énergie mécanique en classe de première »* in *Bulletin de l'Union des physiciens*, Paris VII, numéro 794
[64] Grégoris Nicolis et Ilya Prigogine, *A la rencontre du complexe*, PUF, Paris, 1989, *Op.Cit.*, p. 89.

Le théorème de fluctuation (FT), issu de la mécanique statistique, traite de la probabilité relative que l'entropie d'un système thermodynamique qui est éloigné de la situation d'équilibre (c'est-à-dire l'entropie maximale) puisse augmenter ou diminuer au cours d'un laps de temps donné. Alors que la deuxième loi de la thermodynamique prédit que l'entropie d'un système isolé devrait nécessairement avoir tendance à augmenter jusqu'à ce qu'il atteigne l'équilibre, il est devenu évident, après la découverte de la mécanique statistique, que ce deuxième principe n'est finalement que statistique, suggérant qu'il devrait toujours y avoir un certain nombre non nul. Cela induit la probabilité que l'entropie d'un système isolé puisse spontanément diminuer. Cela dit, le théorème des probabilités quantifie cette probabilité de d'augmentation de l'entropie.

Cela signifie que, au fur et à mesure que le temps augmente ou alors le taille du système, la probabilité d'observer une production d'entropie opposée à celle dictée par la deuxième loi de thermodynamique diminue de façon exponentielle. Nous pouvons expliquer cela par le fait qu'au cours du temps, avec une paroi déformable, la pression peut faire augmenter la taille du système grâce aux interactions des particules avec les bords. Et cela aura des conséquences importantes. Prenons la loi **Boyle-mariotte** qui est la première loi des gaz parfaits. Elle stipule *qu'à température constante la pression d'un système est inversement proportionnelle à son volume*. La formule s'écrit **PV=*constante***, où *P* est la pression, *V* : le volume, la température T qui est ici une constante.Cela signifie que, si on modifie la constance température, c'est-à-dire qu'on choisit une constante plus basse, la pression va nécessairement chuter, en conséquence. A l'inverse, la diminution de la température va engendrer la diminution de la pression selon la deuxième loi des gaz parfaits appelée loi **Gay-Lussac** qui stipule qu'*à pression constante P, le volume V occupé par une masse donnée m de gaz est proportionnel à sa température.* Or, la baisse de température révèle une production d'entropie négative pouvant aller théoriquement jusqu'au zéro absolu (0K ou -273,15^{o}) selon le troisième principe de thermodynamique énoncé Max Planck. Au final donc, on peut voir l'entropie du système isolé diminuer au cours du temps. On peut donc établir un rapport entre les deux premières lois des gaz parfaits (loi Boyle-Mariotte, loi Gay-Lussac) et le troisième principe de thermodynamique tel que nous le verrons en profondeur au deuxième chapitre.

Tout ceci montre que l'entropie d'un système isolé peut bien diminuer contrairement à l'énoncé du deuxième principe de thermodynamique qui se vérifie dans les situations bien

précises où on a négligé expressément certains facteurs, comme le montre Yi-Fang lorsqu'il affirme dans un article très provocateur :

> There is no doubt that the second law of thermodynamics is a great contribution to development of science, and applied widely many aspects. However, the basic principle is the statistical independence: the state of one subsystem does not affect the probabilities of various states of the other subsystem, because different subsystem maybe regarded as weakly interacting (landau, Lifsic and Pitaevskii, 1980). It shows that various interactions among these subsystems are not considered. Such preconditions of entropy increase are: 1) for isolated systems, which are only approximation; 2) various internal interactions in system must be neglected, they must be thermal equilibrium processes, thereby no phase transition[65]

Il faudrait donc négliger toutes les forces mécaniques, à savoir : les frottements, les fluctuations, les changements de phase[66] (dont nous n'avons pas encore parlé mais sur lesquels nous reviendrons au niveau de l'entropie de l'univers proprement dite), pour établir de façon formelle que l'entropie d'un système isolé ne peut qu'augmenter. Tout compte fait, nous voulons montrer que, quand bien même l'univers serait un système isolé, son entropie peut bien diminuer au lieu de croître comme le prouve le théorème des fluctuations.

[65] Yi Fang Chang, *Entropy decrease in isolated systems: theory, facts and test, Op. cit.*

[66] Nous verrons que l'entropie dépend des phases du système. Les phases solides, liquides, gazeuses n'ont pas les mêmes entropies. Elle est plus accentuée dans les phases gazeuses et l'est moins dans les phases solides.

CHAPITRE 2 : LA PRODUCTION D'ENTROPIE DANS LES SYSTEMES ISOLÉS

Le précédent chapitre nous aura permis de planter le décor, en restituant le point de départ de notre travail, à partir de l'observation macroscopique et des constats microscopiques, preuve que notre élaboration s'appuie sur des éléments factuels voire empiriques qui seront, par la suite, renforcés par des théories et des formalismes physiques et philosophiques. Mais pour le moment, il s'agit encore de poser les bases de la lecture entropique dans les systèmes isolés, car ce sont eux qui sont problématiques. En effet, tous les autres systèmes posent la possibilité d'une décroissance entropique sauf les systèmes isolés qui en disent le contraire dans la thermodynamique classique. Le présent chapitre va permettre, d'une part, de bien maîtriser le problème entropique qui fut d'ailleurs découvert et formulé dans le cadre des systèmes isolés. Et d'autre part, il donnera la possibilité de partir des acquis sur les systèmes isolés locaux pour pouvoir faire des inférences à l'échelle de l'univers. En revanche, il s'agira de comparer les systèmes isolés locaux avec production d'entropie avec le système thermodynamique géant qu'est l'univers. Tout cela nous permettra aussi de faire des critiques articulées en violation du deuxième principe de thermodynamique, tant pour ces systèmes isolés locaux que pour l'univers tout entier souvent considéré comme un système isolé.

2.1. Systèmes isolés : charme et fascination

2.1.1. Du 2^{e} principe : énoncé et sens de la diffusion thermique

La question que nous traitons dans ce sous-chapitre n'est pas des moindres. Il s'agit de poser des bases même du second principe de thermodynamique qui est un principe fondamental de la thermodynamique moderne. Pour cela, nous convoquons deux concepts, à savoir : l'entropie et le sens de la diffusion thermique, qui sont, en principe, deux notions qui vont ensemble. Pour ce faire un petit survol historique nous serait utile.

Quand on retrace l'histoire de la thermodynamique, l'on fait généralement appel à deux grandes figures, à savoir Rudolf Clausius principalement et dans une moindre mesure Sadi Carnot. Rudolf Clausius parce que c'est ce dernier qui est l'auteur du concept d'entropie. Dans la

plume de Balibrea, nous pouvons lire ce qui suit : « *the charge of putting the stone in thermodynamics science was Rudolf Clausius in 1850 in the paper, where he coined the term entropy taking of the Greek the word ἐντρπιά (trope) which means transformation and trying to imitate the sound of the word energy. For him the meaning of entropy was the part of energy that eventually and inevitably transforms into a useless heat* »[67]Ce qui signifie que c'est ce dernier qui a forgé le terme à partir du grec et lui a donné le sens qui lui est reconnu scientifiquement. En effet, Clausius raffine et perfectionne les travaux de Carnot effectués en 1824, lui qui avait pourtant fait une erreur monumentale en relisant les travaux de James Watt réalisés 60 ans plus tôt sur l'équivalence entre la chaleur et le travail. J.S. Dugdale rappelle cette préoccupation de Carnot dans ses écrits sur la signification de l'entropie quand il affirme que : « *In 1824 Carnot published his famous memoir Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance. In this truly remarkable work he was concerned with the great question of how to produce mechanical work from sources of heat.* »[68]Carnot avait prétendu cette équivalence à partir d'un exemple théorique bien connu dans le monde de la physique sous le nom du *Cycle de Carnot* qui veut que, dans son moteur ditherme contenant une bouilloire chaude et un condenseur, la quantité de chaleur soit maintenue avant et après le mouvement du moteur. Son cycle proposait donc une réversibilité la chaleur émise et le travail effectué. Il serait le moyen le plus efficace de convertir la chaleur fournie en travail utile. Dans le cycle de Carnot, le moteur a un rendement maximal en raison de l'absence de perte dans la conversion thermomécanique entre la chaleur et le travail. Ce cycle de Carnot bien conçu dans l'idéalité, ne satisfaisait pas les exigences de la réalité qui intègrent les frictions et les frottements mécaniques que Carnot avait ignorés. Ces frottements et frictions créent des pertes au point que, dans la réalité physique, le rendement ne saurait être maximal. C'est ce qu'on retient de ces propos de Francis Balibrea commentant Rudolf Clausius qui lui-même s'en prend au moteur de Carnot quand il affirme :

> The sum of all increments of entropy during a complete Carnot cycle is zero which means that the system increases the entropy when a system receives heat in the same quantity that it loses in the part of the cycle when the system cools. Since Carnot engine was ideal, then it was a

[67]Francis Balibrea, *On Clausius, Boltzmann and shannon Notions of entropy, in Journal of Modern Physics*, Universidad de Murcia, 29 Janvier 2016, *Op.Cit.*
[68]J.S. Dudgale, Entropy and its physical meaning, Taylor and Francis publishers, university of Leeds, 1789, p. 28.

> mechanism of a maximum efficiency. Otherwise, a real engine has unavoidable losses. Finally, both facts means that $\Delta S \geq 0$ which is the second law of thermodynamics.[69]

Ce cycle de Carnot est basé sur une mauvaise interprétation de James Watt qui, dans l'élaboration de son moteur à vapeur ne put éviter les pertes. Jovan Mitrovic, chercheur dans les questions de thermodynamique affirme effectivement cette posture réaliste de James Watt non prise en compte par Carnot dans le fameux *Cycle de Carnot* :

> In 1763, James Watt (1736-1819) was requested to repair a model of the Newcomen heat engine that consisted of a water boiler and a steam cylinder, equipped with a movable piston. In operation, the cylinder was used alternating also as a steam condenser. Watt repaired the model but he did not succeed to set it satisfactorily in operation. Subsequent Watt's analysis of the model that encompassed all energy losses, like mechanical friction and thermal losses of water boiler and the steam-condenser cylinder, revealed that only 25% of the steam generated in the boiler were economically used in the engine, while 75% were wasted (Mitrovic & Smyk, 2021; Mitrovic, 2022a; Mitrovic, 2022b). Watt's analysis dealing with energy dissipation and heat losses is apparently the first work of this kind in the history of (irreversible) thermodynamics.[70]

Ces travaux de James Watt montrent bien que, dans la transformation du travail en énergie, les pertes sont inévitables. Au contraire, elles sont même plus importantes que le rendement final. Dans le moteur de James Watt, elles constituent les 75% du rendement de l'énergie. De ce qui précède, on peut donc catégoriser deux types d'énergie durant le processus, d'après le rendement du moteur, à savoir : l'énergie utile et l'énergie inutile. L'énergie utile est celle qui permet le rendement du moteur et l'énergie inutile est celle qui se dissipe et ne peut pas permettre l'activité. Carnot ne verra donc pas cet aspect des choses. Il croira à l'équivalence absolue entre la chaleur et le travail, en oubliant l'action des forces mécaniques. Il ira même jusqu'à violer le premier principe dans l'explication du maintien de la chaleur totale lors du cycle. Carnot affirme que :

> Taking caloric to represent heat, Carnot describes the steam engine process that James Watt devised some 60 years earlier, patented in 1769 and realized in practice for several decades prior to Carnot's Reflections (Mitrovic, 2022a). According to Carnot, caloric is transported from the boiler (hot body) to the condenser (cold body) and the cause of this transport is the imbalance in the caloric of the considered bodies; this imbalance is the temperature difference in Watt's explanations. In the process, the caloric is—according to Carnot—neither produced nor consumed; the quantity of the caloric that enters the condenser is exactly the same as the one that leaves the boiler. This violates the first principle! Carnot emphasized (p. 46): The production of motive power is then due in steam-engines not to an actual consumption of caloric, but to its transportation from a warm to a cold body[71].

---

[69]Francis Balibrea, *On Clausius, Boltzmann and Shannon Notions of entropy, in Journal of Modern Physics, Op.Cit.*
[70]Jovan Mitrovic, *Irreversible Thermodynamics of James Watt*, in Advances in Historical Studies/Scientific research publishing, Stuttgart, 2022, p.119-128
[71]Jovan Mitrovic, *Sadi Carnot and the Thermodynamics of James Watt*, in Advances in Historical Studies/Scientific research publishing, Stuttgart, 2023, 12, 47-62

Carnot pensait en effet que le mouvement du moteur était dû à la différence de température qui implique le transport de l'énergie de la partie chaude à la partie froide. Il avait oublié l'énoncé du premier principe portant sur la conservation totale de l'énergie interne (E) dans un système isolé qui est l'expression des sommes algébriques de la chaleur produite (Q) et du travail fourni (W), tel que :

E = Q+W.

Dans son examen de la conservation de l'énergie interne du système, il n'avait considéré que la chaleur, selon lui, était la même à la sortie de la bouilloire et à son entrée dans le condenseur. Carnot violait ainsi le premier principe, car si la chaleur était la même, qu'est ce qui expliquerait le mouvement du moteur ? Non la chaleur n'était pas la même, il y avait simplement un système de recyclage dans le cycle de Carnot. Mais au demeurant, il avait fait une découverte fondamentale qui deviendra plus tard un des aspects fondamentaux dans la formulation du second principe de thermodynamique à savoir : la chaleur va toujours spontanément du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid. Cela nous permet d'établir le sens de la transformation ou de l'évolution entropique énoncé dans le deuxième principe de thermodynamique. Il s'énonce comme suit : *« La chaleur s'écoule spontanément des corps chauds vers les corps froids, la chaleur ne retourne pas spontanément du corps froid vers le corps chaud. »*[72]Ce même document de physique, généralise ce sens de la transformation quand, à l'intérieur, l'auteur écrit ce qui suit : *« Nous savons, par l'expérience quotidienne, que les transformations se déroulent spontanément dans un sens et pas dans l'autre, les transformations réelles sont dites irréversibles ».*[73]

L'expérience de Carnot ressort donc le sens de l'évolution spontanée du chaud vers le froid. La spontanéité traduit ici un phénomène naturel qui se déroule sans faire appel à une entité artificielle qui donnerait un résultat programmé et finalisé selon les attentes de celui qui manipule. Si nous avons acquis de Carnot que le sens de l'évolution de la chaleur va du corps le plus chaud vers le corps le plus froid, Rudolf Clausius va revenir sur les balbutiements qui se trouvait dans les calculs de Carnot. Il reconsidéra en situation réelle les pertes négligées par Carnot et pourtant bien élucidées jadis par James Watt qui faisait la différence entre l'énergie utile et l'énergie dissipée. En effet, c'est cette énergie utile qui est considérée comme ce qui

---

[72]*Thermodynamique, Lycée F. BuissonPTSI, le 2e principe, p. 1*
[73]*Ibidem*

produit le travail. Celle-ci, après avoir accompli sa fonction, devait être irrécupérable, car elle avait été complètement transformée en travail tout en la température globale du système. Partant de cette observation Rudolf Clausius va donc clairement reformuler le deuxième principe de thermodynamique en introduisant une grandeur inconnue jusqu'à ce moment-là, à savoir l'entropie décrit donc le sens de propagation de la chaleur dans tout le système jusqu'à l'équilibre thermique à l'état final. Pour Clausius, contrairement à Carnot qui pensait que c'est le transfert de chaleur du corps chaud au corps froid qui produit le travail, il va montrer qu'il s'agit d'une réelle une transformation de la chaleur en travail conformément au premier principe violé par Carnot qui ne voyait pas que c'est la chaleur qui se transforme en travail mais simplement que celle-ci fait travailler le moteur tout en se conservant. On ne peut donc plus avoir la même quantité de chaleur de l'état initial à l'état final, car la chaleur transformée en énergie utile et ayant fait travailler le moteur s'est complètement transformée en énergie inutilisable. Clausius généralise donc l'expérience introduisant l'entropie comme mesure de cette transformation. Elle-même voulant dire transformation de l'énergie qui passe d'un état initial chaud à un état final d'équilibre thermique. Dans un système isolé cette transformation est donnée par la formule :

$$\mathbf{\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}.}$$

C'est Rudolf Clausius qui permet de lier le deuxième principe de thermodynamique à l'état entropique comme nous pouvons le lire dans ces lignes de Francis Balibrea :

> In 1856, Clausius refined his more or less heuristic formulation, using differential calculus, earning precision but loosing intuition. Besides, around 1862 he introduced his notion of entropy and formulated the second law of thermodynamics. And he supplies the following formula:$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$ where ΔS denotes the increment of entropy of a system and ΔQ denotes the increment in heat at temperature T. That is, the increasing of entropy proportional to the increase in heat and inverse to the temperature.[74]

Cela dit, le second principe de thermodynamique énoncé dans le cadre des systèmes isolés sera désormais lié inséparablement à l'entropie dudit système. Laquelle entropie sera toujours considérée comme croissante et jamais décroissante jusqu'à l'atteinte de l'entropie maximale. Dès lors, la fonction entropie sera donnée par la formule suivante :

[74]Francis Balibrea, *On Clausius, Boltzmann and Shannon Notions of entropy*, *in Journal of Modern Physics*, Op.cit.

- Pour toute transformation réelle ou spontanée, dans un système isolé ou alors pour une transformation adiabatique, c'est-à-dire dans laquelle les parois ne permettent pas d'effectuer d'échange de chaleur ni d'énergie avec le milieu extérieur, la formule de l'entropie est :

$$\mathbf{\Delta S_{globale} = S_{création} = \Delta S_{syst} + \Delta S_{ext} \geq 0}$$

Cela signifie que, dans un système isolé, la création d'entropie sera toujours nulle,car un système extérieur capable de lui transmettre chaleur, énergie et matière n'existe pas. Et dans ce cas, la transformation est irréversible.

- Pour une transformation fictive ou non spontanée, dans un système isolé ou pour une transformation adiabatique, la formule de l'entropie s'écrira plutôt :

$$\mathbf{\Delta S_{globale} = S_{création} = \Delta S_{syst} + \Delta S_{ext} = 0}$$

Ce qui précède nous a permis de dégager la formule de l'entropie de James Watt à Rudolf Clausius en passant par Carnot. Nous pouvons dire que, rendu à Clausius, le concept physique d'entropie avait déjà bénéficié d'une élaboration claire et s'était déjà imposé dans la communauté scientifique. Mais jusque-là, il ne s'agissait encore que de la thermodynamique phénoménologique, à savoir celle qui est perçue d'après les changements de phénomènes qui s'y déroulent.

C'est pourquoi elle reposait avantage sur les variables d'état extensifs ou intensifs descriptibles à l'échelle macroscopique comme la chaleur, le travail, la température, la pression, le volume. Mais, 32 ans après Clausius, la thermodynamique va encore connaître un tournant qui lui donnera un autre visage. C'est la thermodynamique statistique reformulée par Ludwig Boltzmann en 1872 grâce à l'introduction des micro-états. Les micro-états sont les différentes combinaisons possibles que peuvent réaliser les particules dans une enceinte à *n corps*. Il faut préciser que Boltzmann va travailler dans la cinétique des gaz où, depuis quelques temps, l'on avait découvert que les gaz sont en fait un ensemble d'atomes ou de particules subissant des *interactions persistantes*. C'est ce que nous écrivions dans un précédant travail à savoir :

> En mécanique statistique classique, un gaz est un grand nombre de molécules en interactions persistantes[75] les unes aux autres suivant les lois de la mécanique classique. L'interaction est une situation où les molécules libres sont projetées contre une cible. C'est le phénomène de dispersion (ou scattering le terme anglo-saxon qui est aussi plus utilisé en français). Ensuite, elles interagissent avec cette cible. Si le *scattering* n'a ni début ni fin, l'interaction est persistante ; sinon elle est transitoire. Dans le cas des gaz, elle est toujours persistante.[76]

Ilya Prigogine affirmait déjà cet état des choses lorsqu'il écrivait : *« Dans la plupart des situations physiques, et notamment dans les systèmes macroscopiques tels les gaz et les liquides, nous avons des interactions persistantes puisque les collisions ne s'arrêtent jamais ».*[77]Francis Balibrea renchérit dans ce sens quand il affirme que*: « Boltzmann was un follower of kinetic theory of gazes introduced by Daniel Bernoulli who considered that all fluids are aggregates of molecules moving continuously. »* [78]Cela dit, les gaz avait déjà acquis ce statut d'assemblage d'atomes ou de particules. L'expérience de Boltzmann consiste donc à avoir deux enceintes Ω_1 et Ω_2 séparées par une cloison. On classe toutes particules dans la première enceinte avec une distribution de température et de pression. Après ouverture de la cloison, les particules auront tendance à se disperser dans les deux enceintes jusqu'à atteindre une situation d'équilibre où on aura le même nombre de particules dans les deux enceintes. Parmi tous les états microscopiques par lesquels doit passer le système, ce dernier est la situation macroscopique la plus probable. L'évolution de l'entropie est décrite par l'évolution vers l'équilibre de température et de la pression dans les deux enceintes signifiant la réduction des collisions et des interactions de particules. La formule de l'entropie selon Boltzmann décrit donc l'ensemble des micro-états du système.

$\Delta S = \log\omega.Kb$

Cela dit, l'entropie est proportionnelle au logarithme de l'ensemble de micro-états qui sont eux-mêmes compatibles avec l'observation à notre échelle. Cette formule de Boltzmann restera célèbre comme étant la formule par excellence de l'entropie dans la thermodynamique moderne. Elle montre que l'ensemble des micro-états d'un système thermodynamique pour une seule mole de gaz est nombre exponentielle $N_A = -6{,}02\times10^{23}mol^{-1}$correspondants au nombre d'Avogadro. Elle montre aussi et surtout que, si le macro-état est une situation d'ordre apparent à

[75] Ce sont des interactions qui ne s'arrêtent pas.
[76]Jospin Brice FOE, *De la dynamique classique à la thermodynamique des processus de non-équilibre : une ontologie de la nature à partir de la physique, chez Ilya Prigogine* (mémoire), 2020, inédit, 2020.
[77] Ilya Prigogine, *La fin des certitudes, op.cit.*, p.139.
[78]Francis Balibrea, *On Clausius, Boltzmann and Shannon Notions of entropy, in Journal of Modern Physics, Op.Cit.*

l'échelle de notre observation, c'est-à-dire, la situation ou l'état le plus probable dans lequel on peut trouver le système parmi tous les micro-états possibles ou simplement la situation la plus probable de se réaliser au niveau macroscopique, les micro-états traduisent son évolution vers le chaos ou le désordre moléculaire jusqu'à une situation chaotique maximale qui est le seuil d'équilibre thermique **($\Delta S \geq 0$).** La théorie de cinétique des gaz décrit donc une évolution thermodynamique d'un système isolé vers une entropie maximale caractérisée par la mort thermique. Si on considère la température comme la mesure de l'énergie, en termes d'énergie mécanique, on peut parler de l'évolution de l'énergie potentielle concentrée du système vers l'énergie cinétique diffuse dans tout le système. Francis Balibrea explique:

> Temperature could be interpreted as a measure of the energy of particles. The termal energy of a gas is identified with the kinetic energy of the individual molecules which explains that heat and mechanical work were different transmission forms of energy. More precisely, Boltzmann identified the temperature of a gas with the mean kinetic energy of its molecules. In an equilibrium state (there is no transmission between two substances of heat since both have the same temperature), there is no transmission of kinetic energy. Otherwise when two substances are not in equilibrium, the kinetic energy goes from the hotter to the colder. This means that average of kinetic energy behaves similarly than temperature and therefore both can be identified[79].

Pour clôturer ce point sur l'entropie et le sens de la diffusion thermique en rapport avec le deuxième principe, nous pouvons dire que, selon Boltzmann, l'entropie est la mesure du désordre moléculaire d'un système dont l'état initial est caractérisé par un non-équilibre de pression et de température d'un certain nombre de particules de gaz vers un état final qui est un équilibre des pressions et des températures dans tout le système. Le sens de la diffusion est que l'on va toujours du point le plus chaud vers le point le plus froid si on considère la température comme une énergie. C'est ce que nous dit la précédente citation de Francis Balibrea: « *Otherwise when two substances are not in equilibrium, the kinetic energy goes from the hotter to the colder.* »[80]

2.1.2. Du principe d'irréversibilité et apories d'une *antithermodynamique* :

Cet aspect de notre travail s'inscrit dans une continuité logique par rapport au sens de la diffusion thermique ou au sens de l'évolution entropique que nous avons traité dans le précédent point qui répondait à la grande question soulevée dans le présent chapitre, à savoir : comment lire la production entropique ? Cette question donne lieu à une alternative qui, depuis la science classique, jusqu'à à la science moderne constitue une *quaestio disputata* dans le monde

[79]Francis Balibrea, *On Clausius, Boltzmann and Shannon Notions of entropy, in Journal of Modern Physics,* Op.Cit.
[80]*Ibidem*

scientifique. C'est ainsi qu'au 20e siècle, Sir Artur Eddington la rattache à une notion qui sera désormais une catégorie fondamentale en physique et en philosophie à savoir : ***la flèche du temps***. C'est ce que nous pouvons lire dans les écrits Tsao Chang, Pen Zhang, Kangjia Liao qui, dans un article, rattachent l'origine de la notion à Arthur Eddington : « *"The arrow of time" has become a popular topic in modern physics. This word, "the arrow of time", is first proposed by British astrophysicist Arthur Eddington in 1927. The research for the grand unified theory is forcing physicists to revisit some very basic assumptions, such as time, because "time" in physics is a basic physical quantity.* »[81] Cette notion semble nous donner une orientation sur le sens de l'évolution des phénomènes physiques et surtout de l'impossibilité d'une évolution inverse dans la réalité concrète. D'où la notion d'irréversibilité très en vogue dans la science moderne et surtout en thermodynamique. Avant de toucher à la notion de flèche du temps, nous allons d'abord asseoir celle d'irréversibilité qui a tracé le sillage de la *flèche du temps*.

Tout commence avec James Watt en 1778 à propos de ses travaux sur la machine à vapeur. Dans ces travaux pour lesquels il fut d'ailleurs breveté en 1769, James Watt montre que, dans le cycle de fonctionnement de sa machine, il faut intégrer les pertes dans l'équivalence entre la chaleur reçue dans l'enceinte de la machine et le travail fourni. Il parlera même de 25% du rendement et 75 % de perte. Le Rendement ne pouvait donc pas être maximal contrairement à ce que proposera Carnot dans son cycle au rendement maximal, qui rentre dans une pure idéalisation. Dans le modèle de James Watt, ces pertes sont consommées dans le cycle du moteur et sont, d'office, irrécupérables pour devenir de l'énergie inutile (pour le travail). Cela montre qu'il existe un gap entre la chaleur qui entre dans le moteur et le travail effectué dans le moteur tant et si bien qu'on ne peut pas renverser le film des évènements de l'état final B à l'état initial A. Même si cela était réalisé, la quantité de chaleur qui entre dans le moteur ne serait plus la même à cause des pertes dues au cycle du moteur, entre autres les forces mécaniques (frottements, frictions etc.). Jovan Mitrovic nous propose de revisualiser cette machine à vapeur de James Watt, qui avait ouvre la porte de la thermodynamique des processus irréversibles, afin de mieux expliquer les dissipations de chaleur et d'énergie qui engendrent un déséquilibre entre la chaleur et le travail rendant la réversibilité impossible.

[81]Chang, T., et al. (2014) *On the Arrow of Time. Journal of Modern Physics*, 5, Scientific research Publishing, Department of Nuclear science and Technology, Fudan University Shangai, Febraury 2014. P 587-590

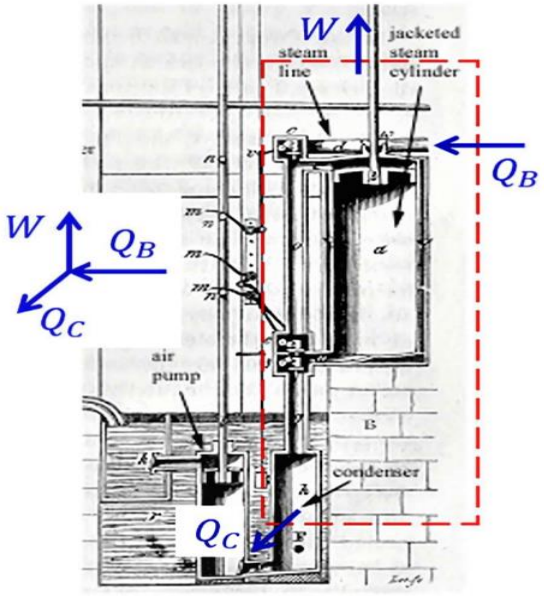


Figure 1 : Une partie du moteur de la machine à vapeur de James watt proposée en 1774 publiée par Mitrovic[82]

$Q_B=W+Q_C$

Q_B représente la chaleur que la substance qui fait tourner la machine absorbe dans la bouilloire (partie chaude)

W représente le travail fourni par la machine

Qc représente la chaleur perdue dans le condenseur de la machine (partie froide)

La chaleur Q_B est scindée en deux dans le cylindre de la machine à vapeurentre le travail W et les pertes Q_C. Cela démontre simplement que l'énergie initiale (la chaleur) ne peut pas complètement être convertie en travail W, une partie est perdue dans le cycle du moteur. Mitrovic affirme que « *While work can be completely converted into heat, the wasted heat Q_C limits the conversion of the heat Q_B into the work W and makes the conversion processes W Q → and Q W → asymmetrical and irreversible. This is an addition to the first law that can be viewed as another, distinct law of thermodynamics. Being deduced solely from the Watt's works it seems*

[82]Figure 1 : Dessin tiré de Jovan Mitrovic, *Irreversible Thermodynamics of James Watt*, in Advances in Historical Studies/Scientific research publishing, Stuttgart, 2022

reasonable to call it the Watt's formulation of the second law of thermodynamics. »[83]Jovan Mitrovic montre par là que james Watt par le fonctionnement de sa machine à vapeur a démontré que la thermodynamique était irréversible et surtout que la symétrie entre l'état initial et l'état final était brisée au point que l'on ne pouvait plus revenir en arrière. Nous pouvons donc conclure que, étant donné le deuxième principe de thermodynamique qui intègre les dissipations dues à un certain nombre de facteurs selon les cas en présence, la thermodynamique des processus irréversibles, à savoir la thermodynamique des phénomènes physiques réels brise la symétrie des évènements physiques.

Tout compte fait, à cette époque cela ne sera pas encore un acquis. La preuve, un siècle plus tard le principe n'est pas encore acquis quand Boltzmann propose le théorème H. Qu'entend-t-on par le théorème H ? C'est un théorème qui décrit une expérience effectuée par Boltzmann et schématisée sous forme d'une fonction. En effet, travaillant dans le cadre de la cinétique des gaz, l'expérience consiste à soumettre des particules à une certaine pression, de qui aura un impact sur les vitesses et les positions. Seulement, une fois que le processus est enclenché, la pression va s'équilibrer dans l'enceinte : c'est la situation macroscopique la plus probable de se produire. Et la situation inverse n'est plus possible. On le qualifie même comme étant la situation macroscopique la plus improbable, à savoir que les particules puissent dans une partie de l'enceinte au point initial. Cela est dû à un simple processus, à savoir : l'augmentation d'entropie qui aurait pu conduire Boltzmann à postuler l'irréversibilité des phénomènes décrits dans l'expérience. Pour mieux comprendre cela, il sera opportun de visualiser cette fonction H telle que réalisée par son auteur.

s

$P_r(t)$: probabilité de trouver le système dans l'état r au temps t

↓

le système tente d'atteindre l'équilibre.

À cause des interactions (H_1 ou U), le système effectue des transitions d'un état à un autre :

W_{rs} : probabilité de transition de r vers s par unité de temps

W_{sr} : probabilité de transition de s vers r par unité de temps

[83]Jovan Mitrovic, *Irreversible Thermodynamics of James Watt*, in Advances in Historical Studies/Scientific research publishing, Stuttgart, 2022, *Op.Cit.*

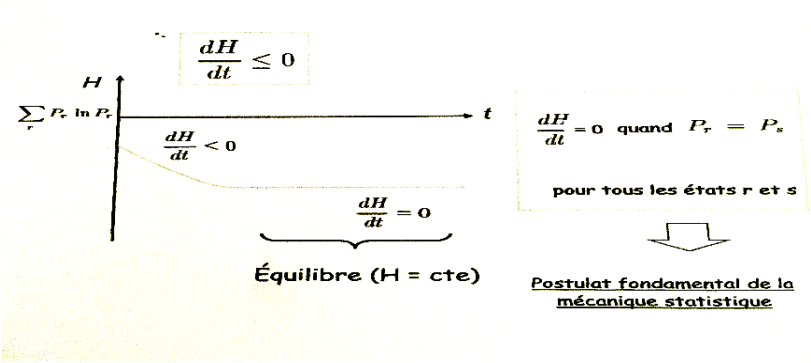


Figure 2 : Version quantique du théorème H de Boltzmann[84]

La figure montre l'évolution de la fonction H sur le temps. Dans cette fonction, il s'agit d'un analogue microscopique de l'entropie. Elle représente l'effet créé par les collisions qui, à chaque instant de l'évolution, modifient les positions et les vitesses des particules de gaz dans l'enceinte. La fonction est construite de façon à décroitre de façon monotone au cours du temps jusqu'au seuil minimal. Dès lors, les collisions ne modifient plus les vitesses dans l'enceinte.

Tout compte fait, Boltzmann fut confronté à deux objections parmi lesquelles celle de Loschmidt qui se demanda pourquoi la fonction décroit-elle alors que les équations de la dynamique sont reversibles. Il proposa ceci : si la fonction H décroit et que, à un moment donné on renverse exactement toutes les vitesses de molécules, dans ce cas, tout comme le mobile galiléen sur un plan incliné, regagnant son altitude initiale, l'évolution dynamique ramènerait celui-ci vers son état initial. Mais, seulement, en voulant renverser la fonction, la grandeur H croît et se remet rapidement à décroître pour revenir au seuil minimal traduisant l'impossibilité de renverser la thermodynamique. Boltzmann ne sut quoi répondre car à cette époque la différence entre la dynamique et la thermodynamique n'était pas encore très claire. En effet, ils confondaient la thermodynamique et la dynamique. Tout ce qui précède nous fait comprendre une chose : si on peut renverser la dynamique, on ne peut pas, dans la réalité physique où l'entropie est une grandeur toujours croissante jusqu'au seuil chaotique maximal, renverser la thermodynamique pour construire une évolution *antithermodynamique* qui évoluerait dans le sens inverse de la thermodynamique. De toute façon, une pareille évolution ne saurait être une évolution spontanée. Si on considère le système thermodynamique comme un système chaotique

[84] Figure 2 : version quantique du théorème de Boltzmann, dessin tiré du site slideplayer.fr

en se référant sur le ***théorème à trois corps***[85] de Pierre Henri Poincaré qui nous fait comprendre qu'à partir de trois corps l'évolution du système devient chaotique et indéterminé, le système thermodynamique est *un système à N corps* qui présente une situation chaotique exponentielle selon la formule de Boltzmann. Pour un seul volume $1cm^3$ de gaz qui contient un nombre de la valeur d'une mole dont le nombre de particules est égal au nombre d'Avogadro soit NA= - $6{,}02X10^{23}$ mol^{-1}.cela dit pour renverser la fonction H, nous ne saurait plus en aucun cas être en face d'un système chaotique mais bien plus, en face d'un système organisé et finalisé. C'est ce que nous disions dans une précédente recherche :

> L'*antithermodynamique* implique un déterminisme de la position de chaque particule de gaz au moment de renverser la thermodynamique et de déterminer également à l'avance son itinéraire pour que chaque décollision recrée ce que les collisions avaient créé, et que chaque décorrélation recrée ce que les corrélations avaient corrélé. Le problème est que ce déterminisme qui soutient l'*antithermodynamique* est contredit par une description d'évolution d'ensemble. Ce n'est pas la trajectoire individuelle qui compte, mais l'évolution dynamique d'une population de particules qui engendre des collisions, des corrélations, des bifurcations, et au final la situation est chaotique. Or, le renversement suppose un système organisé et finalisé pour qu'il y ait une nouvelle distribution de vitesses, et des positions pour réaliser des décorrélations, des décollisions etc.[86]

Cela dit, le deuxième principe de thermodynamique associé à l'entropie empêche la réalisation d'une *antithermodynamique* qui serait la réversibilité des phénomènes et leur retour à l'état initial. C'est ce qui autorise l'intégration de la flèche du temps dans les transformations réelles en thermodynamique. Qu'est-ce que la flèche du temps ?

La flèche du temps dans ce sens n'est pas le temps en lui-même bien qu'elle contienne le temps. Il est simplement l'orientation que doivent prendre certains phénomènes qui se réalisent dans le temps. C'est ce que stipule Etienne Klein quand il affirme que : « *By its very definition, the course of time presupposes the existence of a well-established course of time with which - in addition - certain phenomena have their own temporal orientation*. »[87]La flèche du temps indique donc des phénomènes dont le sens de l'évolution dans le temps est unidirectionnel comme une

---

[85] En 1889, Henri Poincaré présenta un mémoire sur *« Le problème à trois corps et les équations de la dynamique. »* Poincaré partit, en effet, de l'étude du système solaire (notamment de l'étude des trajectoires orbitales Soleil-Terre-Lune) pour démontrer pour la première fois le phénomène chaotique. Il pose que la gravité aurait beau obéir à des lois physiques, celle-ci engendre un phénomène chaotique, c'est–à-dire, un ensemble d'ordre et de désordre. C'est ce qu'on appellera le chaos déterministe.

[86]Jospin Brice FOE, *De la dynamique classique à la thermodynamique des processus de non-équilibre : une ontologie de la nature à partir de la physique, chez Ilya Prigogine* (mémoire), 2020, inédit, 2020, *Op.Cit.*, p.83

[87]Etienne Klein, *What does the arrow of time stand for ?*in *Natural science*, Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière (larsim) centre d'études de Saclay 91191gif sur Yvette cedex, France ; Vol2, n^0 3, 212-219

flèche qui est lancé et qui ne peut retourner en arrière. Ainsi les phénomènes thermodynamiques sont-ils irréversibles et orientés eux-mêmes vers un futur qui échappe à l'observateur. Pour Etienne Klein, la flèche du temps n'est pas une propriété du temps en tant que tel mais une propriété de certains phénomènes physiques dont la dynamique est unidirectionnelle. Il affirme à propos: « *contrary to what the expression "arrow of time" suggests, it is therefore not a property of time itself but a property of certain physical phenomena whose dynamic is irreversible.* »[88]En outre, il revient de considérer la flèche du temps comme le contenu des évènements qui se déroulent dans la course du temps ou le continuum temporel dont l'évolution future nous échappe alors que nous connaissons état initial. Dans ce sens, Ilya Prigogine fait une grave erreur en affirmant dans la *Nouvelle Alliance* que la science moderne est celle du *temps retrouvé.* Il affirme que « *la physique, aujourd'hui ne nie plus le temps. Elle reconnait le temps irréversible des évolutions vers l'équilibre, le temps rythmé des structures dont la pulsion se nourrit du monde qui les traverse, le temps bifurquant des évolutions par l'instabilité et amplification de fluctuations et même le temps microscopique […] les hommes de science ont cessé aujourd'hui de nier ce que, pour ainsi dire, chacun savait. C'est pourquoi l'histoire de la science négatrice du temps fut aussi une histoire des tensions sociales et culturelles.* »[89] La physique a-telle jamais nié le temps. Il est tantôt arbitraire, tantôt absolu, tantôt relatif tantôt fictif. Il convient plutôt de dire que la physique n'a jamais oublié le temps ni même l'ignoré. Le problème est que la science classique a confondu le temps et la flèche du temps. Prenant alors la flèche du temps pour le temps à cause de certains évènements de la dynamique qui était réversibles, elle a affirmé la réversibilité du temps et son isotropie. Alors que c'était la réversibilité des phénomènes qui se déroulent dans le temps. Le temps lui-même est aussi affecté d'une flèche, mais qui n'est pas la flèche du temps ; elle indique simplement une orientation que suit le continuum temporel. La flèche du temps unidirectionnel en thermodynamique traduit le fait que les phénomènes thermodynamiques qui se déroulent dans le continuum temporel sont irréversibles dans la réalité, ce qui va impliquer la mort thermique dans le cadre de la thermodynamique des systèmes isolés.

[88] Etienne Klein, *What does the arrow of time stand for ?*in *Natural science*, Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière (larsim), *Op.cit*

[89] Ilya Prigogine, Isabelle Stengers, *La Nouvelle Alliance Métamorphose de la science,* Paris, Gallimard, 1979, p. 366-367.

2.1.3. De la mort thermique

Les précédents développements sur le second principe de thermodynamique dans un système isolé ont montré que, dans sa formulation classique depuis Rudolf Clausius en 1850 et Ludwig Boltzmann en 1872, et dans une moindre mesure James Watt en 1774 (qui n'avait pas explicitement évoqué le terme puisqu'il n'était pas encore connu mais avait découvert le principe), l'entropie croissait jusqu'au seuil maximal ($S \geq 0$). Ce processus d'évolution de l'état entropique traduit simplement le comportement de l'énergie ou bien de la chaleur au sein du système.

Si on explique à partir de l'énergie, on dira que l'énergie va d'un point concentré pour se diffuser dans tout le système. On dira alors qu'on part de l'énergie potentielle E_p du système à l'énergie cinétique E_c qui se diffuse dans tout le système plongeant ce dernier dans une sorte de mort du point de vue de ses forces mécaniques. Car l'énergie mécanique est somme de l'énergie potentielle et des énergies cinétiques du système tel que :

$$E_m = E_p + E_c.$$

Ainsi, un système où l'énergie potentielle est complètement transformée en énergie cinétique est un système qui sombre dans l'inactivité du point de vue de sa description macroscopique, car les forces qui permettent le mouvement sont toutes à l'équilibre. Nous avons dit que cela représente, sur une infinité de possibilités microscopiques ou micro-états dans lesquelles on peut trouver le système, la situation la plus probable à l'échelle macroscopique. Cette situation d'équilibre thermodynamique qui correspondait à l'entropie maximale ($S=0$), les physiciens l'appellent mort thermique.

Si on explique à partir de la chaleur comme les thermodynamiciens classiques, on dira que la chaleur va du point le plus chaud vers le point le plus froid jusqu'à ce que toute la chaleur soit également répartie dans tout le système en conformité avec le principe zéro de thermodynamique qui est un principe d'isothermie. Le principe zéro ne traite pas d'entropie mais de température. Il fut énoncé dans le cadre des systèmes communicants tel que, si le système A est en équilibre thermique avec le système B, et le système B en équilibre thermique avec le système C, le système A l'est aussi avec le système C. En dehors du contexte où la loi a été

énoncée, nous retenons que l'idée fondamentale, c'est l'isothermie ou l'équilibre de température dans un système.

Avec le second principe de thermodynamique tel que formulé par Sadi Carnot qui met davantage en surlignage le sens de la propagation de la chaleur, il convient de souligner ici que la chaleur introduite dans le système isolé va se répandre dans toute l'enceinte en partant du point le plus chaud vers les autres points jusqu'à atteindre l'équilibre thermique. Dans le processus de transformation de la chaleur en travail, la chaleur qui est introduite est une chaleur qui est sensée produire un travail et quand se produit l'équilibre thermique dans le système, elle devient une énergie inutile, incapable de produire un travail. Dans ce cas, l'équilibre thermique peut être considéré comme une mort thermique.

Les physiciens du 20^{e} siècle ont tôt fait d'inférer ces observations locales à l'échelle universelle en déclarant que l'entropie de l'univers croit graduellement comme c'est le cas dans les systèmes isolés, et que l'univers tend irréversiblement vers la mort thermique, qui serait l'équilibre thermique de la chaleur originelle issue du big bang. C'était d'ailleurs l'intention de Sadi Carnot de dégager des lois thermodynamiques qui seraient applicables à tous les systèmes thermodynamiques. Il affirme précisément que « *To see in its full generality the principle of production of work by heat, we must think of it independently of any particular agent ; we must establish arguments applicable not only to steam engines but to any imaginable heat engine whatever the working substance and whatever its manner of working*. »[90]Il était donc question d'une ambition démesurée d'appliquer les arguments applicables non pas seulement à la seule machine à vapeur mais à toutes les machines où la chaleur est utilisée quelle que soit la substance qui les fait fonctionner ou leur manière de fonctionner. Il ambitionnait ainsi les principes qui soient coextensifs à tous systèmes thermodynamiques, car la chaleur n'est en fait que la perception, à notre échelle, du comportement microscopique des particules. Or, en cosmologie, on a l'habitude de dire que l'univers est un système thermodynamique géant. Ilya Prigogine illustre bien cette vision quand il déclare que *« L'univers est un système thermodynamique géant. A tous les niveaux, nous rencontrons des instabilités et des bifurcations*. »[91]Si l'univers est donc vu lui-même comme un système thermodynamique, l'ambition de Carnot fut d'appliquer les

[90] J.S. Dudgale, *Entropy and its physical meaning*, Taylor and Francis publishers, University of Leeds, 1789, *Op.Cit,*

[91] Ilya Prigogine, *La fin des certitudes, Op.Cit.*, p. 222

principes de sa machine thermodynamique à tous les systèmes thermodynamiques peut bien s'appliquer à l'univers. C'est cela que fera Boltzmann en calculant l'entropie de l'univers comme celui d'un système thermodynamique isolé. Dans cette mesure, l'entropie de l'univers est sans cesse croissant ; ce qui signifie que l'univers court vers sa mort thermique. En d'autres termes, l'entropie étant définie comme la mesure du désordre, on peut conclure que le taux de désordre du contenu de l'univers est croissant alors que sa température diminue considérablement. Parti d'une température de 10^{32}K à la fin de l'ère de Planck, c'est-à-dire, 10^{-43}secondes après le big bang, celle-ci est allée decrescendo en relation avec l'expansion de l'univers pour se retrouver à 3000K, 380 000 ans après le big bang, lorsqu'il y eut la séparation de la matière avec la lumière émettant le premier rayonnement du corps noir encore appelé *rayonnement fossile* qui constitue *le fond diffus cosmologique* découvert en 1965 par Arno Penzias et Robert Wilson. Ce *fond diffus cosmologique* qui indique la température actuelle de l'univers qui n'est plus que de 2.7 K, alors que de récentes études montrent qu'elle était de 20 K un milliard d'années après le big bang, et de 5,1 K il y a 7,2 milliards d'années. Wikipédia confirme ces chiffres. On peut y lire ce qui suit :

> La température de l'univers a été extrêmement élevée juste après le Big Bang,). Ensuite elle n'a pas cessé de diminuer, en relation directe avec l'expansion de l'Univers (détente adiabatique). La température est en particulier passée au-dessous de 3 000 K environ 380 000 ans après le Big Bang, ce qui a enclenché la Grande recombinaison et l'émission du rayonnement cosmologique. En 2022, la température de l'univers un milliard d'années après le Big Bang a pu être mesurée à a peu près 20 K, confirmant que l'univers s'est refroidi très rapidement après le Big Bang[4]. La température de l'univers il y a 7.2 milliards d'années a été mesurée à 5,1 K [92]

Cela prouve que la température de l'univers diminue avec son expansion. On a effectivement pensé que l'univers se comporte comme un système thermodynamique isolé à entropie croissante puisque, parti d'une température exponentielle de 10^{32} K, il ne présente plus qu'une simple faible température de 2,7 K. Ilya Prigogine confirme cela quand il déclare :

> C'est une découverte expérimentale qui a conduit la majorité des physiciens à renoncer au modèle de l'univers stationnaire pour adopter le modèle du big bang, dès lors surnommé le « modèle standard. » C'est la découverte par Penzias et Wilson en 1965 du désormais fameux rayonnement fossile à 2,7 K. L'existence de rayonnement avait été prédite par Alpher et Herman qui montrèrent qu'il était une conséquence du big bang. Si l'univers à ses premiers instants a été extraordinairement dense et chaud, il a dû être opaque car les photons devaient avoir assez d'énergie pour interagir avec la matière et ne se propageait donc pas librement. Or, on peut montrer que cet équilibre matière et lumière est détruit à environ 3000 K. La lumière se dégage alors de la matière et forme un rayonnement de corps noir, ou rayonnement thermique, caractérisé par sa seule température. A partir de ce moment, la seule transformation qu'aient pu subir les photons qui forment le rayonnement thermique est le changement de longueur d'onde.

[92]https://fr.wikipedia.org/wiki/Temperature_de_l'Univers

> Celle-ci augmente avec la taille de l'univers, ce qui signifie que la température du rayonnement diminue.[93]

Ces propos de Prigogine confirment que la température de l'univers diminue sans cesse, pourtant il est parti d'un point extraordinaire chaud. Ainsi, La mort thermique universelle qui s'accompagnerait du *big chill* semble être une hypothèse tenable. C'est cette lecture de l'évolution thermodynamique universelle qui plongea Boltzmann dans l'angoisse dans laquelle, il mourût à l'idée de savoir que l'univers court inexorablement vers la mort thermique.

Au demeurant, ce premier point de ce deuxième chapitre nous a permis d'exposer le principe qui est au cœur de notre recherche, à savoir : le deuxième principe de thermodynamique, de son origine à son évolution, et surtout de maîtriser les catégories qui font partie de son extension et de sa compréhension, entre autres : la chaleur, le travail, l'énergie, les populations de particules, le chaos et particulièrement l'entropie. Nous avons noté que des réflexions sur les systèmes isolés à l'échelle locale ont permis d'inférer de nombreuses conclusions à l'échelle globale, à savoir : l'échelle de l'univers. Le point suivant va essayer d'éprouver la thermodynamique classique basée principalement sur ce deuxième principe. On pourra donc évoquer d'autres principes plus récents comme le 3^{e} ou encore le 4^{e} principe, pour réévaluer le second principe de thermodynamique, cher à la thermodynamique classique.

2.2. Phénomènes troubles des systèmes isolés

2.2.1. Le troisième principe de thermodynamique

Nous venons de rappeler le deuxième principe de la thermodynamique qui énonce une croissance de l'état entropique dans les systèmes isolés et ses conséquences multiples à l'échelle locale et à l'échelle globale. Maintenant, il est question de vérifier la pertinence de ces énoncés et leurs formulations pour espérer tirer des conclusions satisfaisantes. Ainsi dit, il est question de se pencher sur les phénomènes troubles des systèmes isolés tels que, nonobstant la loi ou les lois thermodynamique(s) établie(s) par le deuxième principe, nous observons rarement, dans ces systèmes les prévisions attendues.

Le troisième principe est un principe qui se base sur le refroidissement du système à des températures très basses. Cela dit, avant d'énoncer le troisième principe tel que formulé par les

[93] Ilya Prigogine, *La fin des certitudes*, Odile Jacob, Paris, 2001, p.208.

physiciens Planck, Nernst, Einstein etc., il est important de partir de la formule de l'entropie donnée par Clausius. Elle est donnée dans le rapport entre la chaleur reçue par un système et sa température thermodynamique, tel que $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$, tel que l'augmentation de l'entropie est proportionnelle à l'augmentation de la chaleur et inversement proportionnelle à la température. Alors, il est logiquement correct de dire que, pour un gaz parfait, si l'on baisse la température, cela va entrainer une chute de la chaleur. Autrement dit, une baisse de température va faire diminuer les mouvements des particules dans l'enceinte. Car la chaleur n'est rien que le comportement des particules dans une situation d'agitation thermique. C'est ce que nous rappelle Pascal Marquet quand il dit *que « Thermodynamics teaches us that the notion of temperature corresponds to the temperature measurement of the energy of the microscopic agitations of atoms or molecules in solids, liquids or gas […] »*[94]Le refroidissement de la température va donc influencer les mouvements des particules qui seront moins excitées et moins en collision. Et en revanche, cela va nécessairement influencer l'entropie du système. Ce qui donnera une diminution de l'entropie d'un instant T_1 du système à l'instant T_2.

On aura $\Delta S = S2\text{-}S_1 = \frac{\Delta Q2}{T2} - \frac{\Delta Q1}{T1}$ avec $\frac{\Delta Q2}{T2} < \frac{\Delta Q1}{T1} \leftrightarrow s_2 < s_1$.

On peut donc voir que l'entropie de ce système diminue avec la baisse de sa température. A l'inversement du deuxième principe qui stipule que l'élévation thermique implique une élévation d'entropie, le troisième principe va impliquer exactement le contraire. Il suffit donc d'un changement de paramètres pour que le deuxième principe balance vers un autre principe : le troisième principe qui va donc se jouer sur un aspect très simple, à savoir : la diminution de température. Le troisième principe, en fait est visualisable par une inversion des paramètres du deuxième principe. Si ce dernier se fonde sur la chaleur introduite dans le système qui agit comme une énergie potentielle concentrée qui va s'infiltrer dans toutes les parties du système provoquant au final, une situation de désordre ou de chaos moléculaire à l'échelle microscopique, le troisième principe, lui, de façon simple se fonde sur le cas contraire. C'est ce que nous rapporte Yi-Fang Chang sur la base des expériences effectuées sur la décroissance entropique due à la réduction de la température : « *We studied carrefully and found that negative temperature is*

[94] Pascal Marquet, The third law of thermodynamics or an absolute definition for Entropy. Part 1 : the origin and application in thermodynamics. Météo-France, CRMM/GMAP, Toulouse, 2019, p. 1

contradiction with usual meaning of temperature and with some basics concepts of physics and mathematics, and derived necessarily entropy decrease dS> 0 »[95] C'est la diminution de température du système, faisant baisser en même temps l'entropie, qui tend à générer des structures ordonnées et organisées. Ce qui témoigne d'une diminution d'entropie.

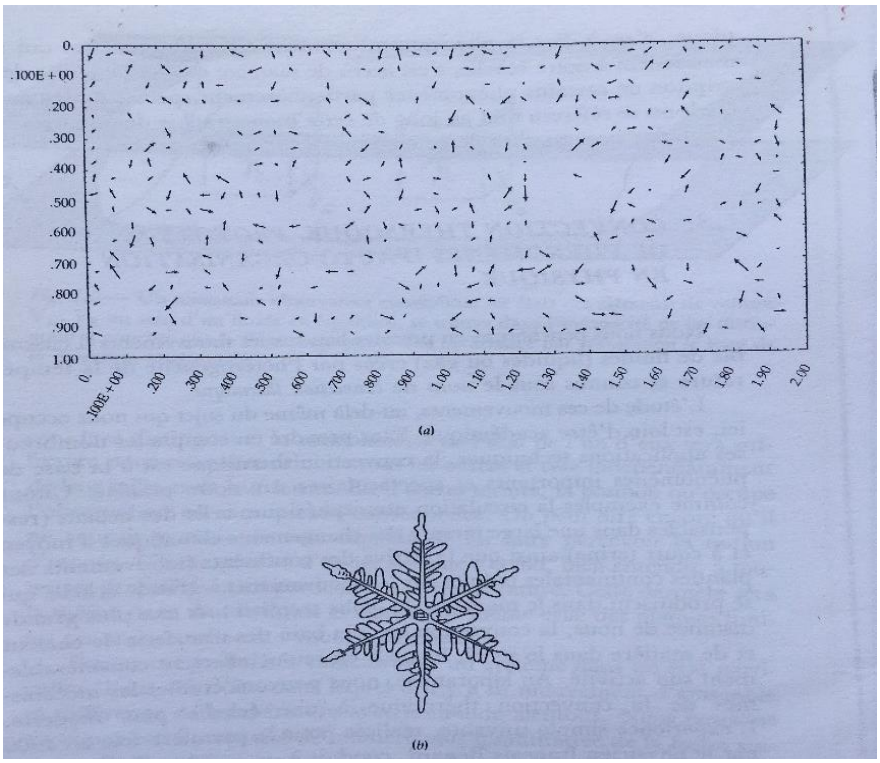


Figure 3 : Illustration de deux situations possibles d'un système, d'une chaotique et l'autre ordonnée

Le schéma représente deux situations possibles d'un même système. En (a), on a un système complexe avec l'introduction de la chaleur qui crée une croissante d'entropie. Celui-ci restera à l'état chaotique au niveau microscopique. En (b), on a un système complexe avec réduction de la température qui crée une décroissance de l'entropie. Au niveau macroscopique, on a la formation d'un flocon de neige. Qui témoigne de la tendance à engendrer des structures ordonnées.

[95]Yi Fang Chang, *Entropy decrease in isolated systems: theory, facts and test, in International Journals of Fundamental Physical Science (IJFPS) Vol 10, N^0 2, Op.Cit.*

.

Le troisième principe tel que développé plus tard par Max Planck qui fait davantage une généralisation de l'équation de Boltzmann sur les températures froides ne sera rien de plus qu'une sophistication de ce qui était déjà évident.

Au premier cas, on a, $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T \to 0+}$ Avec entropie croissante. Au deuxième cas, on a $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T \to 0-}$ avec entropie décroissante.

Cela dit, venons-en au troisième principe proprement dit. Ce principe est un principe qui fait diminuer l'entropie quel qu'en soit les cas. Il s'énonce comme suit : L'entropie d'un corps à l'état cristallin au zéro absolu 0 K est de zéro. On peut lire ce qui suit: « *the third law of thermodynamics extends the definition of entropy. Entropy is zero only in a perfect crystal at absolute zero (0 Kelvin [-273.15 degree Celsius]).* »[96]La troisième loi stipule donc que si lorsque la température d'un corps pur tend vers le zéro absolu (0 Kelvin), l'entropie du système tend aussi vers zéro. A la température zéro absolu d'un corps pur, il n'y a plus d'énergie thermique ou de chaleur dans les particules ; les atomes du corps pur cristallin sont parfaitement alignés et ne bougent plus. Ainsi on aura mathématiquement la formule de la variation d'entropie suivante $\Delta S \Rightarrow \lim_{T \to 0-} \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_T = 0-$

Cela signifie que lorsque la température du système baisse, son entropie baisse conséquemment. Donc, si la température tend vers une valeur zéro absolu, l'entropie S converge vers une valeur S_0 telle que son entropie est nulle. La formule de Max Planck qui a été très vite découverte par Boltzmann juste cinq ans après ses travaux est $S = \log(w).Kb + S_0(0K)$

Or, puisque que l'état entropique est un état extensif, au zéro absolu, l'entropie est nulle. Donc, la constante $S_0(0K)$ n'influence pas le résultat. C'est pourquoi cette constante a disparu de la formule finale que Planck a fait graver sur la tombe de Boltzmann.

Il reste donc que $S = \log(w).Kb$. Or, par expérience de pensée (on n'a jamais atteint la valeur zéro absolu), tous les micros-états du système, à l'instant T avant que T ne tende vers T_0, sont figés à l'instant T_0 pour former une seule configuration tel que $W = 1$. On aura $log\ (1) = 0$. Ce qui rend le résultat nul. C'est ce que nous dit Pascal Marquet, dans son développement sur l'entropie, quand il affirme que « *In the formula of Planck appears the constant S_0 (0K) which*

[96]*Engineering thermodynamics/Third Law* in Wikibook, open book for open world.

disapperared from the famous Planck formula inscribed on Boltzmann's tomb S= logw.Kb. This constant corresponds to absolute zero temperature where, by hypothesis, all statistical microstates are generated into a unique configuration of maximum probability w=1, leading to log (w) =0 by definition of logarith and therefore to S=0 if the constant S is set to zero. »[97]Le troisième principe nous sert d'argument pour soutenir que l'entropie peut décroître dans n'importe quel système isolé, ouvert ou fermé à condition que l'on fasse baisser sa température. Quand cela est fait, l'entropie du système baisse en même que la température et tend vers le zéro absolu. Nous le disons davantage en l'endroit des systèmes isolés, car ce sont eux qui sont les plus délicats en matière de réduction d'entropie. C'est dans leur cadre que le deuxième principe associé à la croissance de l'entropie avait été énoncé. C'est encore dans ces systèmes que le désordre est le plus considérable. C'est également sur la base de ces systèmes que nous pouvons faire des insinuations avec le système thermodynamique global, à savoir : l'univers, considéré par le modèle standard ΛCDM comme un système isolé.

2.2.2. Des forces mécaniques et des fluctuations à la réduction entropique

Le deuxième principe de thermodynamique est un principe qui milite en faveur de la croissance de l'entropie dans sa forme originelle. Et ceci, parce que les conditions dans lesquelles il a été énoncé étaient des conditions qui supposaient des systèmes isolés ou à évolution adiabatique. Ce genre de systèmes exclut, en principe, les dissipations d'énergie qui sont des mécanismes où s'effectuent les échanges au bord du système permettant donc au système de recevoir l'entropie de l'environnement. Ainsi, lorsqu'il existe ces échanges, on aurait, dans ces systèmes, une entropie du système et une entropie de l'environnement, et les deux seraient supérieures ou égales à zéro. $S_{globale} = S_{syst} + S_{env} \geq 0$. Pour ces systèmes qui permettent donc les échanges au bord, rien n'empêche que l'entropie reçue de l'environnement soit inférieure à l'entropie créée. Dans ces cas il y aurait nécessairement une diminution de l'entropie du système. Mais, seulement pour les systèmes isolés ou pour les évolutions adiabatiques, l'entropie reçue de l'environnement est nulle, car les systèmes ne permettent pas d'échanges au bord avec l'extérieur. Le calcul de l'entropie s'écrit donc simplement $S_{globale} = S_{syst} \geq 0$, avec $S_{env} = 0$.

[97]Pascal Marquet, The third law of thermodynamics or an absolute definition for Entropy. Part 1 : the origin and application in thermodynamics. Météo-France, CRMM/GMAP, Toulouse, 2019, p. 7.

Cela dit, dans ces systèmes, il devrait y avoir une d'entropie exclusivement croissante. Mais, une chose curieuse est observée : l'entropie décroit dans de nombreux cas dans les systèmes isolés à cause de nombreux facteurs, au rang desquels : les forces mécaniques nommément les forces de frottements et la résistance de l'air. Ainsi, Garcia-Sandoval pense que la plupart des systèmes sont dissipatifs incluant ceux contraints par les lois thermodynamiques, sous-entendu le deuxième principe. Il affirme:

> The notion of dissipativity has been widely used to analyze open systems for which it is assumed that the dissipated energy, which is always non-negative, is the difference between the stored energy variation within the system and the amount of energy supplied by the environment or surroundings. Thus, given this energy–balance feature, it is clear that system stability is intimately related to dissipativity. In this context, it has been shown that many physical processes may be dissipative, including those that are constrained by the laws of thermodynamics (Rojas et al., 2008).[98]

Cela dit, les forces dissipatives ne sont pas seulement présentes dans les systèmes ouverts comme cela peut être imaginé. Les systèmes isolés les développent également. D'où la mention faite par l'auteur de la précédente citation quand il dit qu'il a été prouvé que de nombreux processus mécaniques sont dissipatifs, incluant ceux qui sont contraints par les lois de la thermodynamique. Dans un système isolé, les forces de frottement, ainsi que la résistance de l'air ne peuvent pas manquer, c'est pourquoi il faut nécessairement les inclure dans la réflexion et dans les calculs. Nicolis Gregoris et Prigogine affirment :

> L'importance des frottements, forme particulière de la dissipation, fut perçue bien avant que la dynamique ne soit formulée. Quand Aristote émit l'hypothèse selon laquelle les systèmes, relevant de la dynamique sublunaire, devaient tendre vers un état de repos, il ne faisait rien d'autre qu'exprimer l'idée qu'il existe une sorte de « frottement » susceptible de ralentir le mouvement. A cet égard, le principe d'inertie, selon lequel la grandeur mécanique de base est l'accélération et non la vitesse, correspond à une idéalisation où les frottements sont négligés. [99]

Le problème qui se pose très souvent est que lorsque ces forces sont très faibles, on a tendance à les négliger. Et pourtant elles influencent bel et bien le résultat final de telle enseigne que le processus est irréversible. C'est ce que l'on appelle l'*effet papillon* dans les systèmes instables qui sont caractérisés par la sensibilité aux conditions initiales. Cette sensibilité est la caractéristique même d'un système chaotique. L'effet a beau être faible mais il joue sur le décompte final. Parlant donc de ces effets faibles qui jouent sur le décompte que l'on caractérise par le terme *effet papillon*, Prigogine affirme que *« Si nous réussissons à faire tenir un crayon sur*

[98]Garcia-Sandoval J.P, Hudon N, Dochain Denis, Conservative and dissipative phenomena in thermodynamical systems stability in IFAC-PapersOnline, vol 49, 2016, p.28 -33

[99]Nicolis Grégoris et Prigogine Ilya, *A la rencontre du complexe*, PUF, Paris, 1989, *Op.Cit*, p. 67

sa pointe, l'équilibre est instable. La moindre perturbation le fera tomber d'un côté ou de l'autre…On parle de "sensibilités aux conditions initiales" telle que l'illustre la parabole bien connue de l'"effet papillon " ; le battement des ailes d'un papillon dans le bassin amazonien peut affecter le temps qu'il fera aux Etats-Unis. »[100]

Maintenant, demandons-nous comment ces forces agissent-elles pour produire des dissipations d'énergie dans n'importe quel système. Nous savons que l'énergie mécanique d'un système est la somme de son énergie potentielle et de son énergie cinétique, selon la formule $\mathbf{E_m=E_c+E_p.}$ De là, nous pouvons interchanger les termes de la formule selon les lois de l'arithmétique où $\mathbf{Ec = - Ep}$. Il y a donc un transfert de l'énergie potentielle en énergie cinétique et vice-versa. Or, nous savons, par principe que, les forces dissipatives sont des forces non conservatives ; leur action consiste à diminuer l'énergie mécanique d'un système. Leur formule est donnée dans la relation $\mathbf{F\not{f}=\mu Fn}$ où $F\not{f}$ est la magnitude de friction, μ le coefficient de friction. Ces forces transforment l'énergie mécanique en chaleur ou en énergie thermique. Ainsi, dans les forces dissipatives, le chemin suivi est important, car c'est dans ce chemin qu'une grande quantité d'énergie mécanique est perdue et transformée en chaleur. Et cette perte de chaleur va entrainer l'irréversibilité du phénomène, car les forces mécaniques sont perdues au profit d'autres forces d'énergie. Nous pouvons reprendre à cet effet notre expérience de pensée où un météore entre dans l'atmosphère avec une certaine vitesse entre 54 000 km/h à 108 000 km/h qui sont des vitesses cosmiques typiques. Cette météorite ne frappera pas la terre à ces vitesses cosmiques, les forces de frottement vont ralentir sa vitesse ainsi que la résistance de l'air qui agira ici comme une poussée d'Archimède. En revanche la température de la météorite va augmenter au point de s'enflammer. En tenant compte de la résistance de l'air, on aura une nouvelle équation $\mathbf{F_{air} = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A}$ où ρ est la densité du fluide, v est la vitesse, C_D le coefficient de traînée et A est la section de l'aire traversée. La météorite est ralentie par toutes ces forces dissipatives aussi bien les frottements et la résistance de l'air. La météorite entrant dans l'atmosphère représente la molécule dans un système thermodynamique. Elle subit donc ces forces dissipatives dans sa course au point que l'ensemble du système ouvert, fermé ou isolé va subir une dissipation d'énergie. C'est ce que disait Garcia-Sandoval en incluant tous les systèmes dans les dissipations

[100] Ilya Prigogine, *La fin des certitudes, Op.Cit.,* p. 35.

d'énergie quand il affirme que « *many physical processes are dissipative, including those that are constrained by the law of thermodynamics*. »[101]. Cette brisure de symétrie entre l'énergie potentielle et l'énergie cinétique va empêcher le système de connaitre le maximum entropique. Car, l'énergie potentielle concentrée n'est pas complètement transformée en énergie cinétique diffuse dans le système. Au contraire, elle est détournée en énergie thermique. Aussi pouvons-nous dire que les dissipations d'énergies dues aux forces mécaniques ont pour conséquence, au bout du compte, de faire baisser l'entropie du système thermodynamique. On va donc observer que l'entropie du système va décroitre et effectuer un écart à l'équilibre.

A côté de ces forces mécaniques, nous pouvons également évoquer les fluctuations qui constituent un aspect important dans l'étude des systèmes complexes. Rappelons-nous ; les systèmes complexes sont des systèmes qui, du point de vue microscopique, sont des systèmes chaotiques caractérisés par la sensibilité aux conditions initiales. Cela va sans dire, ce sont des systèmes constitués de particules en interaction. Ces interactions font que l'évolution de système échappe à l'observateur. C'est ce que nous font comprendre Nicolis Gregoris et Ilya Prigogine qui, dans leur conception de la complexité, intègrent hasard et fluctuation. Ils affirment que « *Dans tous les systèmes complexes physicochimiques, les facteurs aléatoires sont présents en permanence et se manifestent à travers le mécanisme des fluctuations thermodynamiques internes.* »[102] Elles sont donc des évolutions spontanées imprévisibles dues au hasard qui entraînent des déviations à l'intérieur du système, souvent de façon locale. Nos deux chercheurs poursuivent dans le même sens en mettant l'accent sur la dimension macroscopique locale de ces évènements :

> Typiquement, une fluctuation apparaît sous forme d'un évènement localisé à très faible échelle. Par exemple, dans une petite partie d'un système macroscopique, un certain nombre de particules peuvent acquérir une grande vitesse thermique comparée à celle que présentent leurs voisines. De la même manière, la densité des particules dans un autre faible volume peut atteindre une valeur moindre que celle du voisinage, et ainsi de suite. Nous pouvons aisément comprendre que de tels évènements se produisent essentiellement au hasard. [103]

[101] Garcia-Sandoval J. P, Hudon N, Dochain Denis, Conservative and dissipative phenomena in thermodynamical systems stability in IFAC-PapersOnline, vol 49, 2016, *Op.Cit.*
[102]Nicolis Grégoris et Prigogine Ilya, *A la rencontre du complexe*, PUF, Paris, 1989, *Op.Cit*, p. 191
[103]*Idem*,p. 88

Cela dit, les fluctuations caractérisent les systèmes complexes caractérisés par la sensibilité aux conditions initiales. Ces systèmes, de nature chaotique, connaissent beaucoup d'événements qui se produisent au hasard ; des hasards dus soit aux perturbations venant de l'environnement, pour les systèmes ouverts ou fermés, soit alors des déviations intrinsèques. Du point de vue des évolutions spontanées intrinsèques, cela peut bien être attribué aux interactions moléculaires. De façon grossière, il est dit que, dans les gaz ces interactions sont dites persistantes car elles ne s'arrêtent pas tandis que pour un liquide, elles sont dites transitoires, car elles s'arrêtent dans les situations d'équilibre thermodynamique. Le phénomène des déviations témoigne de l'omniprésence de ces interactions à tous les niveaux, même dans un liquide où elles seront certainement moindres que dans un gaz. Nicolis et Prigogine ont mesuré de façon expérimentale un système complexe formé d'entités en interaction. Ils rapportent ceci : « *un enregistrement d'états instantanés révèlera l'existence de déviations incessantes vis-à-vis des valeurs de référence que présentent les variables macroscopiques d'état, déviations générées d'une manière spontanée indépendamment de son environnement. Nous appellerons fluctuations de telles déviations intrinsèques.* »[104]Au demeurant, nous pouvons voir que les fluctuations peuvent obliger l'entropie d'un système de croître ou de décroître spontanément de façon tout à fait imprédictible même dans un système isolé. C'est pourquoi grâce aux phénomènes des fluctuations, le deuxième principe de thermodynamique devient un principe statistique. Cela signifie plus clairement que, l'entropie d'un système isolé ne croit pas nécessairement, mais il peut croître, selon les cas, d'après les observations faites à partir des fluctuations dans les systèmes complexes. Dans le premier chapitre, nous faisions déjà mention de ce qu'on appelle *le théorème des fluctuations*. Il limite le deuxième principe de thermodynamique. Alors que celui-ci prédit que l'entropie d'un système isolé devrait avoir tendance à augmenter jusqu'à ce qu'il atteigne l'équilibre, il est devenu évident, après la découverte de la mécanique statistique que la deuxième loi n'est pas une loi absolue mais une réalisation statistique. Le théorème suggère, en effet, qu'il devrait toujours y avoir un certain nombre non nul parmi les évolutions possibles. Cela sous-entend la probabilité que l'entropie d'un système isolé puisse spontanément diminuer ; ces probabilités de l'évolution du système sont quantifiées par le théorème des probabilités. Voici comment se présente le théorème des probabilités $\frac{\Pr\ (\Sigma=A)}{\Pr\ (\Sigma=-A)} = e^{At}$

[104]Nicolis Grégoris et Ilya Prigogine, *A la rencontre du complexe*, PUF, Paris, 1989, *Op.Cit*, p. 89

Yi Fang Chang montre que les fluctuations peuvent dériver très souvent de l'ordre, ensuite elles engendrent des interactions internes. Ce qui montre qu'elles peuvent provenir d'un équilibre thermodynamique et créer, par ailleurs, un écart à l'équilibre. Ces écarts à l'équilibre sont des preuves certaines qu'il y a eu une réduction de la production entropique dans le système en question passant du seuil maximal à l'équilibre à une production inférieure au seuil maximal dans la situation d'écart à l'équilibre. En effet les interactions sont les signes que les particules sont pourvues d'une énergie potentielle ; par contre à l'équilibre, elles sont dépourvues de cette énergie qui s'est complètement diffusée dans tout le système sous forme d'énergie cinétique. Mais, les fluctuations redonnent vie aux particules en provoquant des interactions qui leur redonnent de l'énergie potentielle. Or, en physique, on sait que l'une des définitions de l'énergie potentielle c'est bien cette énergie qui est due aux interactions de particules. Il affirme que « *Usually fluctuations can derive order, and fluctuations may be origin of internal interactions in isolated system.* »[105]

En revanche, les fluctuations toujours présentes dans un système thermodynamique montrent à suffisance que le deuxième principe de thermodynamique n'est pas toujours vérifié, dans la mesure où le système peut connaître des évolutions spontanées dues au hasard. Ce qui, dans la thermodynamique traditionnelle, était considéré comme une règle devient une éventualité parmi tant d'autres. Ceci nous permet simplement d'établir que le deuxième principe de thermodynamique, d'après la loi des fluctuations, est un cas rare. Cela étant, puisque c'est une possibilité, ne fusse que théorique (une situation idéale) que l'entropie peut croître, intéressons-nous maintenant à ce que nous pouvons appeler le *nouveau message de l'entropie.*

2.2.3. Le nouveau message de l'entropie

Ici, nous allons simplement faire le point sur tout ce que nous avons eu à dire, à constater et même à théoriser dans les systèmes isolés à propos de l'entropie. Le moins qu'on puisse dire est qu'il faut reconsidérer les débats sur l'entropie des systèmes isolés. Etant donné que l'entropie des autres systèmes ne pose pas en réalité problème. Dans les systèmes ouverts et fermés ; il est clair que l'entropie d'un système peut croître ou décroître en fonction des variables d'états reçus

[105]Yi Fang Chang, *Entropy decrease in isolated systems: theory, facts and test, in International Journals of Fundamental Physical Science (IJFPS) Vol 10, N^0 2, Op.Cit.*

de l'environnement. Alors, la délicatesse de notre investigation repose sur les systèmes isolés qui sont une catégorie physique à part.

Le nouveau message de l'entropie nous impose donc d'être moins suffisant moins fiers à propos de ce que nous pouvons dire de la nature. De l'ancien message au nouveau message de l'entropie, nous n'avons fait que raffiner nos connaissances sur les systèmes thermodynamiques et élargi la notion. Il n'y a pas de changement de paradigme entre l'ancien message de l'entropie et le nouveau message en tant que tel, mais un raffinement conceptuel davantage. Initialement, lorsque le concept d'entropie voit le jour, c'est un concept physique décrivant uniquement le comportement de l'énergie calorifique au sein d'un système thermodynamique. Il était alors tout à fait normal que la notion soit intimement liée à l'évolution de la chaleur et à son rendement final dans le cycle du moteur. La notion était alors essentiellement utilitaire. Ses théoriciens étaient d'ailleurs des ingénieurs, à l'instar de Carnot. Aujourd'hui la notion s'est élargie et a intégré beaucoup de paramètres, beaucoup de domaines scientifiques et surtout beaucoup de subtilités. Nous avons vu que l'ancien message sur le sens de l'entropie était celui de son évolution croissante dans un système isolé jusqu'au seuil d'entropie maximale. Ce principe d'évolution issu des travaux de Rudolf Clausius s'appuyait sur ceux de Sadi Carnot qui avait établi trente ans plus tôt le sens de la diffusion thermique qui va spontanément d'un corps chaud vers un corps froid. Voilà ce que nous pouvons appeler l'ancien message de l'entropie. Cela dit, l'entropie devrait avoir un sens privilégié celui du sens des évènements qui ont lieu à l'intérieur du système. Au regard de ce qui se passe au niveau microscopique par rapport au mouvement de particules qui se dispersent de toute part dans l'enceinte, créant des collisions, l'entropie était vue dans ce sens comme une mesure du désordre d'un système à plusieurs corps. C'est la grande contribution de Ludwig Boltzmann qui comprendra que les variables d'état intensives, par exemple la chaleur et la pression, correspondaient aux collisions des particules élémentaires dans l'enceinte ou sur les parois expliquant la sensation qui est perçue à l'échelle macroscopique. Cela étant, le désordre devait essentiellement être croissant et jamais décroissant jusqu'au seuil chaotique maximal encore appelé équilibre thermodynamique. C'est pourquoi, l'entropie a été assimilée au principe de destruction. On lui assignait un rôle destructif, et il était associé à la mort thermique. Cette mort thermique programmée était un principe d'évolution de la nature dans sa liberté. Autant que le système isolé tend vers sa mort thermique en vertu de sa croissance

entropique, l'univers tout entier comme un système thermodynamique géant tend vers cette fatalité physique inévitable. D'où la fameuse anxiété de Boltzmann dont il en mourut.

Cependant, les débats sur l'entropie vont prendre un nouveau souffle avec Max Planck qui, restant toujours très proche de Boltzmann, va poser le principe d'une décroissance entropique à partir des équations de Boltzmann. En effet, quelques années seulement après Boltzmann, Max Planck montrera que l'évolution vers le désordre d'un système, prétendue par ses prédécesseurs n'était dû qu'à la variable *chaleur* du système. A l'inverse, si on le refroidissait graduellement, l'entropie chuterait de façon monotone vers une température hypothétique inatteignable correspondant au zéro absolu. C'est le troisième principe. Ainsi, l'entropie d'un système pouvait bien décroitre. La flèche du temps comme sens des évènements pouvait donc être opposé au temps. Ces découvertes ont pu permettre d'établir un double sens de la flèche révélatrice de l'évolution entropique.

Mais, aujourd'hui, le nouveau message de l'entropie va au-delà du troisième principe. Il intègre des notions tels que le hasard, les perturbations, les bifurcations, toutes choses qui relèvent de la science moderne ; une science complexe caractérisée par la sensibilité du système aux conditions initiales. La notion d'équilibre elle-même sera très discutée.et débattue dans les hautes sphères de la thermodynamique. Elle sera désormais considérée comme une description macroscopique et jamais microscopique, car au niveau microscopique la nature a tendance à fuir l'équilibre. L'obtention des valeurs dites de « référence » qui caractérisent la situation d'équilibre est toujours approximative. Le système passera presque près de l'équilibre ou tout au moins effectuera des écarts à l'équilibre sans toutefois rester en équilibre thermodynamique. On peut donc assister à une croissance entropique, puis spontanément à une décroissance de l'entropie locale au voisinage de la fluctuation. Dans ces cas, il devient difficile de maîtriser le comportement réel de l'entropie du système isolé dans ces situations très complexes. Ajoutons à cela les forces dissipatives. Les forces dissipatrices racontent les problèmes d'une réelle croissance entropique dans un système thermodynamique isolé : les forces mécaniques en présence viennent déjouer les prédictions du second principe de thermodynamique sur l'évolution du système vers une entropie maximale. Nous avons vu que les frottements et la résistance du milieu impacte sur la transformation de l'énergie potentielle en énergie cinétique : une bonne partie de l'énergie mécanique étant détournée en énergie thermique. Au vu de cela, nous

pouvons dire que ces forces dissipatives, dans les systèmes isolés, jouent le rôle que les dissipations elles-mêmes jouent dans les systèmes ouverts et fermés. Or, l'entropie de ces systèmes est bel et bien décroissante. Etant donné qu'aucun système ne peut évoluer sans frottement ni résistance du milieu, le deuxième principe devient une idéalisation théorique. Au lieu de dire que l'entropie des systèmes isolés croît de façon monotone jusqu'au maximum entropique, on pourrait plus tôt dire que l'entropie des systèmes isolés pourrait croitre ou décroître car, rien ne l'empêche de décroître à moment donné. Le second principe ne devient au final qu'une probabilité statistique laissant au système une grande liberté évolutive lui permettant de baisser ou d'augmenter son entropie.

Il est donc important de noter que l'entropie a deux rôles possibles qui sont développés par les systèmes isolés, à savoir : un rôle constructeur et un rôle destructeur. La thermodynamique classique avait davantage privilégié une entropie destructrice, annonciatrice du chaos et synonyme de mort, rendant la physique anxieuse de ses découvertes. Aujourd'hui, avec les recherches poussées dans le domaine, l'entropie n'est plus nécessairement associée à la mort, au chaos ou à la destruction. Les situations d'entropie maximale ou d'équilibre thermodynamique sont rares voire approximatives. Ce sont des situations qui sont généralement des descriptions macroscopiques (*coarse description*) qui ne tiennent pas toujours compte des réalités microscopiques traversées par des fluctuations internes, des déviations et bifurcations etc. En général, les systèmes ont tendance à s'écarter de l'équilibre pour se retrouver loin de l'équilibre. Des photocopies successives des micro-états au repos d'un système thermodynamique X dévoileront des images différentes à chaque instant t_1, t_2 et t_3 prouvant l'instabilité ou la non-intégrabilité du système où les particules, malgré l'équilibre thermodynamique, continuent leur voyage en revenant une infinité de fois vers leur position initiale. Ce que prouve le théorème de récurrence de Poincaré. Or la situation d'écart à l'équilibre (proximité à l'équilibre ou éloigne de l'équilibre) témoigne en réalité d'une entropie non maximale. Ce qui signifie que le système a réduit son entropie grâce aux forces dissipatives. Dans le cadre des systèmes ouverts et fermés, les dissipations venant de l'environnement ont permis au système de réduire son entropie. Cela nous amène à nous interroger sur l'entropie de l'univers auquel on applique généralement le deuxième principe. Tout compte fait, il ressort de notre analyse que l'entropie n'est plus associée au désordre, à la mort inévitable ; elle devient même un principe de vie. Le prochain chapitre

nous permettra d'approfondir ce nouveau message de l'entropie dans la mesure où l'entropie n'est plus assimilée essentiellement à la destruction, mais aussi à la construction.

CHAPITRE 3 : AU-DELÀ DES SYSTEMES ISOLÉS

Nous nous sommes appesanti sur le deuxième principe de thermodynamique au chapitre précédent. Ce principe fait appel obligatoirement aux systèmes isolés dans le cadre desquels il avait été formulé. Il était fondamental dans la thermodynamique classique de James Watt, Sadi Carnot, Rudolf Clausius pour qui l'entropie était croissante dans les situations réelles, ou nulle dans les situations idéales. Mais, la pensée scientifique ne s'est pas arrêtée à ce niveau. Les études le comportement de l'entropie ont continué en s'étendant sur d'autres cas de figures tels que les systèmes ouverts et les systèmes fermés qui n'étaient très intéressants pour l'ingénierie mécanique de l'époque. Mais, l'intérêt de la thermodynamique va déborder le cadre de l'ingénierie mécanique pour s'étendre à d'autres domaines de la vie comme les organismes vivants ou les grands systèmes en interactions. A ce moment, une attention particulière sera accordée aux systèmes ouverts et fermés. Dans ce chapitre, après avoir défini la particularité des systèmes ouverts et fermés, nous allons analyser comment la production entropique s'effectue dans ces derniers.

3.1. Des systèmes ouverts et fermés

3.1.1. Des dissipations à l'entropie décroissante

Les systèmes ouverts et fermés sont des types fréquemment utilisés dans la thermodynamique moderne ou, du moins, ce sont des types qui constituent les systèmes thermodynamiques à l'échelle locale. Car, comme nous le savons, les systèmes isolés que nous avons précédemment étudiés au chapitre 2 et dont le charme fait d'eux un sujet passionnant grâce à leur fameux second principe, ne sont en fait que des idéalisations. Car, en physique, un système thermodynamique isolé au sens propre du terme n'existe pas. Nous savons que la matière est essentiellement poreuse. Donc, au niveau microscopique, les particules à l'échelle de Planck continuent de transiter entre un système isolé et son environnement. A la seule différence que l'on peut décider de façon consensuelle d'ignorer ces échanges microscopiques à un certain

moment. On parle alors d'un système isolé. C'est ce que nous fait comprendre Yi-Fang Chang dans ses recherches sur les systèmes thermodynamiques :

> There is no doubt that the second law of thermodynamics is a great contribution to development of science, and applied widely many aspects. However, the basic principle is the statistical independence: the state of one subsystem does not affect the probabilities of various states of the other subsystem, because different subsystem maybe regarded as weakly interacting (landau, Lifsic and Pitaevskii, 1980). It shows that various interactions among these subsystems are not considered. Such preconditions of entropy increase are: 1) for isolated systems, which are only approximation; 2) various internal interactions in system must be neglected, they must be thermal equilibrium processes, thereby no phase transition[106]

Dans la précédente citation, il ressort que les systèmes isolés sont des approximations, et par conséquent, l'on ne peut réellement parler d'un tel système qu'après avoir mis de côté un certain nombre de facteurs, à cause de leurs influences négligeables à une certaine échelle. Tout ce que nous venons de dire revient simplement à établir que tous les systèmes ou, du moins, la plupart des systèmes sont des systèmes soit ouverts soit fermés.

Cela dit, entre les deux, la différence n'est pas énorme. Les systèmes fermés sont des systèmes où il existe uniquement des échanges d'énergie, de chaleur et de travail entre le système considéré et son environnement. Alors que les systèmes ouverts sont des systèmes où il y a échange de matière et d'énergie. C'est que nous disent Arthur Shavit et Chaim Gutfinger lorsque qu'ils affirment que :

> Hence, for a system to be defined, one must specify its exact boundaries and the contents within these boundaries. If matter is not allowed to cross the boundary, the system is referred to as a closed system or simply as a system. Obviously, when no matter crosses the boundary, the amount of matter within the closed system is constant, ignoring the effects of relativity. If matter is allowed to cross the boundary, the system is referred to as an open system. The open system is contained within a control volume and surrounded by a control surface. The terms open system and control volume are interchangeable. The boundary of the system may be real or imaginary, and it may be stationary or changing with time; it must, however, be well defined at all times[107]

De ce qui précède, il ressort donc que, parmi les systèmes thermodynamiques, certains effectuent des échanges de chaleur, de travail et d'énergie et en même temps de matière avec leur environnement : ce sont des systèmes ouverts. D'autres se content des échanges de travail, chaleur et énergie uniquement : ce sont des systèmes fermés. A propos des systèmes fermés,

[106] Yi Fang Chang, *Entropy decrease in isolated systems: theory, facts and test,Op. Cit.*
[107]Arthur Shavit and Chaim Gutfinder, *Thermodynamics. From concepts to applications*, CRC Press Taylor and Francis group, 2008, *Op.Cit*

puisque le travail et la chaleur sont des interactions, et que ces interactions impactent sur l'énergie totale du système, les systèmes fermés échangent donc ces propriétés avec leur environnement. De l'autre côté, les systèmes ouverts, en plus échangent la matière avec l'environnement.

Au demeurant, nous pouvons dire que ces systèmes sont les plus nombreux en physique voire en chimie. Car, ce sont ces systèmes qui constituent la nature physique sur la base de ce que nous avons dit précédemment, à savoir : les systèmes isolés sont des systèmes fictifs ou des situations idéalisées. La physique traite donc en général des systèmes ouverts ou fermés.

Puisqu'il s'agit de parler de leur spécificité, il est important de noter que ces systèmes sont des systèmes caractérisés par les phénomènes dits de dissipation au sens propre. Il ne s'agit plus simplement de forces dissipatives comme nous les avons vues au chapitre précédent (forces mécaniques dues aux frottements, à la résistance de l'air ou de l'eau et aux fluctuations), mais il s'agit des échanges réels avec l'environnement au bord du système où une quantité de travail, de chaleur ou d'énergie est déversée dans l'environnement ou à l'extérieur du système. Les systèmes ouverts sont donc des systèmes aux grandes dissipations présentant des parois perméables aux échanges. Ce que nous voulons démontrer ici est le rapport étroit entre les systèmes ouverts et les dissipations. Ces systèmes sont qualifiés de systèmes dissipatifs à cause d'importants échanges aux bords du système. C'est cette idée que défend García-Sandoval lorsqu'il affirme :

> The notion of dissipativity has been widely used to analyze open systems for which it is assumed that the dissipated energy, which is always non-negative, is the difference between the stored energy variation within the system and the amount of energy supplied by the environment or surroundings. Thus, given this energy–balance feature, it is clear that system stability is intimately related to dissipativity. In this context, it has been shown that many physical processes may be dissipative, including those that are constrained by the laws of thermodynamics (Rojas et al., 2008).[108]

De ce qui précède, on peut associer dissipations et systèmes ouverts, en posant que les systèmes ouverts impliquent des dissipations d'énergie, de travail et de chaleur. Cela étant, puisque, notre réflexion porte fondamentalement sur le comportement de l'entropie, nous allons analyser les variations et les productions d'entropie par rapport aux dissipations dues au contact avec l'extérieur. Au vu de ces échanges, il paraît clair que l'entropie du système sera fortement

[108] Garcia-Sandoval, J.P, Hudon N, Dochain Denis, *Conservative and dissipative phenomena in thermodynamical systems stability* in IFAC-PapersOnline, vol 49, 2016, *Op.Cit.*

influencée par l'entropie du milieu extérieur. Sachant donc que l'entropie est une fonction additive, pour toute production d'entropie dans un système ouvert, on aura :

$S_{créée} = S_{ext} + S_{syst} \geq 0$, pour les situations réelles.

Or, rien n'empêche que l'entropie du milieu extérieur soit négative par rapport à celle du système. Dans ce cas, si l'apport d'entropie du système extérieur est inférieur à celui du système, on aura une création d'entropie négative telle que

$S_{créée} < 0$ puisque $S_{ext} < S_{syst.}$

Donc, $\mathbf{S_{créée} = S_{ext} + S_{syt} < 0.}$

Dans ce cas de figure où l'entropie de l'environnement est inférieure à celle du système, le bilan entropique sera tel que l'entropie de l'environnement va faire diminuer l'entropie du système. On assistera à une production d'entropie négative. C'est le cas par exemple d'une bouteille d'eau chaude d'un litre à une température 30^o C que l'on enferme dans une enceinte froide d'un volume $1m^3$. On suppose une température de 0^o C comme température régnant dans cette enceinte. Il y a donc une grande différence de volume et de température entre les deux systèmes. L'expérience porte donc sur deux systèmes, comme dans le cadre des ensembles grands canoniques ou situations canoniques de Gibbs, sauf que dans notre cas, on ne suppose pas l'enceinte froide comme un réservoir d'infinie énergie. C'est un réservoir simple pouvant subir les influences du deuxième système constitué par la bouteille d'eau chaude. La bouteille, quant à elle, est constituée d'une paroi permettant d'échanger sa chaleur avec l'enceinte froide. Selon le principe zéro thermodynamique, à savoir : le principe d'isothermie, la température finale à l'équilibre thermique sera la même partout. En d'autres termes, l'enceinte froide aura tendance à se réchauffer. Ce qui veut dire que la bouteille chaude va donner de la chaleur à l'enceinte froide. Ce qui veut dire simplement qu'il y a un transfert thermique de la bouteille chaude à l'enceinte froide, conformément au deuxième principe de thermodynamique qui établit le sens de la diffusion de la chaleur comme allant spontanément du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid. Cela étant, essayons de simuler par les calculs les variations d'entropie.

On sait que la variation d'entropie, en version quantique, s'écrit : $\Delta S=\frac{Q}{T}$. Calculons maintenant la variation de l'entropie totale, Appelons Ω_1 la bouteille chaude, et Ω_2 l'enceinte froide. $\Delta S_{totale} = \Delta S_1+\Delta S_2$.Or, l'enceinte chaude perd de la chaleur et la transmet à l'enceinte froide. Alors, on écrira,$S_{totale} = -\frac{Q}{T1}+\frac{Q}{T2} \Leftrightarrow Q\left(-\frac{1}{T1}+\frac{1}{T2}\right)$

Finalement, on aura $\Delta S= Q\left(\frac{T1-T2}{T1T2}\right)$

Or, la température T_2 de l'enceinte froide étant définie très basse par rapport à la température T_1 de la bouteille, et le volume de celle-ci étant 1000 fois très supérieur au volume de l'enceinte chaude, intuitivement, la quantité infime de chaleur δQ transmise à T_2 s'avère très insignifiante pour chauffer l'enceinte Ω2. A l'équilibre thermique, on aura donc une production d'entropie négative après dissipation de la chaleur de l'enceinte chaude Ω_1 vers l'enceinte froide Ω2. A partir de notre expérience simple, il apparaît que les systèmes ouverts sont des systèmes hautement dissipatifs, et en régime non stationnaire où la quantité de chaleur, d'énergie ou de matière reçues ne correspondent pas à la quantité qui en ressort, leur entropie varie énormément. Dans ces cas, on pourra avoir une production positive ou négative d'entropie selon les cas. C'est dans ce sens qu'on pourra observer des évolutions plutôt décroissantes d'entropie à l'opposé du deuxième principe. Puisque la température T_2 de l'enceinte froide Ω_2 est inférieure à T_1 de l'enceinte chaude Ω_1, l'entropie de S_1 de l'enceinte Ω_1 aura tendance à décroître pour que les deux systèmes se retrouvent en équilibre thermique S=0. Cet équilibre s'obtiendra lorsque les deux enceintes seront en isothermie. Il y aura donc une diminution de la température de l'enceinte Ω_1, qui provoquera une réduction des interactions de particules de l'enceinte chaude qui auront moins de collision à l'état final plus qu'à l'état initial. Cette diminution des interactions traduit la diminution des forces mécaniques en présence, à savoir : les frottements et les collisions. Or, nous savons que la formule d'entropie : $\Delta S=\frac{Q}{T}\geq 0$ signifie que, lorsque le système reçoit de la chaleur, son entropie augmente. A l'inverse, lorsque la température diminue, l'entropie diminue également. Pour revenir à notre exemple, la chute de température entrainera la diminution de l'entropie de l'enceinte Ω_1 initialement chaude, mais qui devient froide au cours du temps, à cause des températures très basses imposées par l'environnement très froid.

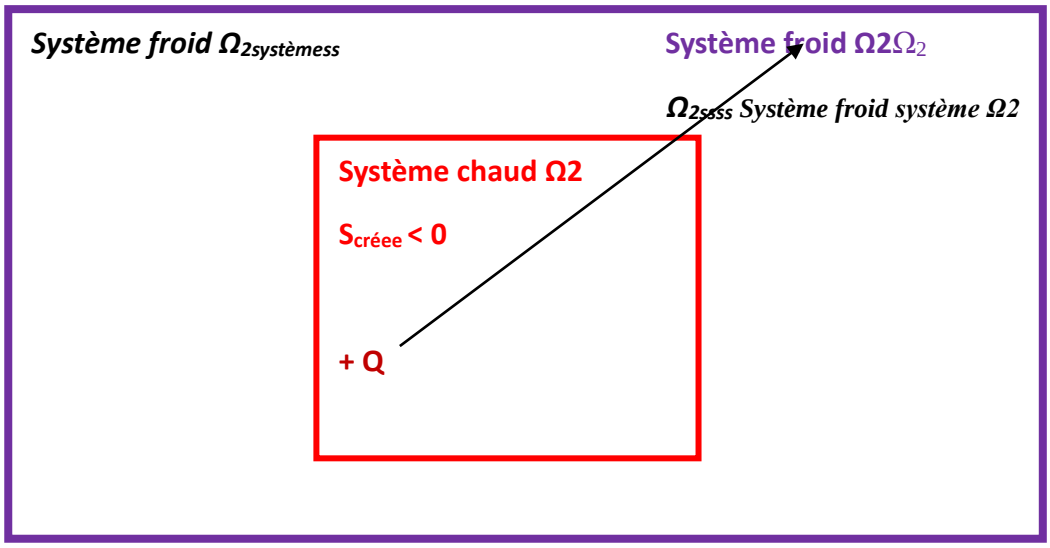


Figure 4 : Illustration d'un transfert thermique du système Ω1 au système Ω2

Le système Ω_1, qui est chaud, présente un volume très réduit comparativement au système Ω_2 qui lui, est très froid. Malgré la chaleur émise de Ω_1 àΩ_2, le système Ω_2 restera très froid. Lors de l'atteinte de la situation d'isothermie entre les deux systèmes, l'entropie du système Ω_1 aura diminué.

Enfin de compte, les systèmes ouverts et fermés nous offrent donc la possibilité de concevoir la production entropique dans les deux (sens croissant et décroissant). Les systèmes ouverts et les systèmes fermés sont le lieu de production par excellence de l'entropie négative. Car, un environnement de très basse température peut impacter sur l'entropie du système à étudier au point de faire décroitre son entropie. Alors que, pour le système isolé, rien ne prédispose l'entropie à décroitre. Les forces de frottements, les fluctuations et d'autres phénomènes mécaniques à effet dissipatif, comme la résistance du milieu, auront beau freiner la croissance de l'entropie, celle-ci va quand même croître même si le système va connaitre des écarts à l'équilibre comme nous l'avons signalé au chapitre 2, à cause des fluctuations internes inhérentes au système. A contrario, dans les systèmes ouverts et fermés, on peut appliquer des contraintes extérieures au système au point de faire croître son entropie ou alors de la faire décroître brusquement. Les systèmes ouverts et fermés sont donc à la base d'un autre type d'entropie opposée à l'entropie classique, à savoir l'entropie négative ou néguentropie. Ainsi, ces systèmes peuvent se retrouver loin de l'équilibre thermodynamique où matière s'auto-assemble. Car à l'équilibre, il n'y a pas de possibilité d'un quelconque d'auto-assemblage. L'éloignement

de l'équilibre, grâce aux phénomènes dissipatifs qui engendrent une entropie négative, permet donc aux systèmes ouverts et fermés d'éviter la fameuse mort thermique presque inévitable pour les systèmes isolés qui, eux, ne peuvent dissiper leur entropie, leur énergie ou leur chaleur dans l'environnement. En revanche, les processus dissipatifs observables dans les systèmes ouverts et fermés peuvent être considérés comme opposés à leur croissance entropique. Ces processus dissipatifs donnent à ces systèmes une spécificité autre, à savoir : les systèmes ouverts et fermés peuvent éviter la mort thermique qui la conséquence de l'état équilibre thermodynamique caractérisé par l'entropie maximale, ceci grâce à leur éloignement de l'équilibre, producteur d'entropie minimale. Le cas de figure que nous avons pris montre à suffisance comme un système ouvert dissipe sa chaleur dans son environnement et subit des températures basses qui font diminuer en même temps son entropie. Plus les contraintes extérieures seront extrêmes, plus l'entropie tendra vers 0 K. On pourra écrire : $\lim_{T\to 0}(\frac{\partial S}{\partial X}) = 0$.

Cela signifie qu'une température froide venant de l'environnement sera opposée à la croissance de l'entropie du système étudié. On peut donc conclure que les systèmes ouverts et les systèmes fermés qui ne sont différents que dans les contenus à échanger avec l'environnement, sont des systèmes où on assiste souvent aux dissipations qui permettent au système de ne pas entrer dans la mort thermique ou du moins d'effectuer des processus réducteurs d'entropie leur permettant de s'écarter du maximum entropique pour s'éloigner de l'équilibre. Les systèmes sont caractérisés de structures dissipatives, c'est-à- dire des structures qui dissipent leur énergie mécanique ou leur énergie calorifique en d'autres types énergies, faisant diminuer l'entropie de la structure. Les structures dissipatives permettent d'aboutir, dans bien des cas, à la thermodynamique non linéaire de non-équilibre qui est selon Ilya Prigogine la thermodynamique des processus irréversibles loin de l'équilibre par opposition à la thermodynamique linéaire qui est la thermodynamique des processus à l'équilibre ou proches de l'équilibre thermodynamique. Par rapport à cette thermodynamique des processus loin de l'équilibre Prigogine affirme ceci :

> Thermodynamics leads to an initial general conclusion concerning systems that are liable to escape the type of order governing equilibrium. These systems have to be "far from equilibrium." In cases where instability is possible, we have to ascertain the threshold, the

> distance from equilibrium, at which fluctuations may lead to new behavior, different from the "normal" stable behavior characteristic of equilibrium or near-equilibrium systems.[109]

Loin de l'équilibre, les dissipations produisent un comportement nouveau différent de celui qui est observable à l'équilibre ou à la proximité de l'équilibre, à savoir : chaos moléculaire. Bien plus loin de l'équilibre, la situation engendre une structure complexe appelée par Prigogine « structure dissipative » qui est la preuve d'un auto-assemblage des particules naguère dans une situation de chaos moléculaires. Cela est la conséquence d'une production d'entropie minimale dans l'ensemble du système. Il affirme:

> Classical thermodynamics leads to the concept of "equilibrium structures" such as crystals. Benard cells are structures too, but of a quite different nature. That is why we have introduced the notion of "dissipative structures," to emphasize the close association, at first paradoxical, in such situations between structure and order on the one side, and dissipation or waste on the other. We have seen in Chapter IV that heat transfer was considered a source of waste in classical thermodynamics. In the Benard cell it becomes a source of order. The interaction of a system with the outside world, its embedding in non-equilibrium conditions, may become in this way the starting point for the formation of new dynamic states of matter-dissipative structures.[110]

La précédente citation montre que le milieu extérieur joue un rôle important pour imposer certaines contraintes au système étudié ; qui plus est, ces contraintes peuvent être extrêmes au point de lui faire engendrer des formes macroscopiques complexes qui brisent la symétrie spatiale présente aux états d'équilibre et de proximité à l'équilibre. Ce sont donc les *structures dissipatives* issues des dissipations de la chaleur interne du système dans l'environnement et le nouvel ordre imposé par les contraintes extérieures au système. Yi Fang Chang fait comprendre par ailleurs que, le deuxième principe nécessite des préconditions afin qu'il soit vérifié/ Parmi ces préconditions, il y a celle d'une thermodynamique linéaire ou des processus à l'équilibre ; si ce n'est pas le cas, c'est-à-dire si nous n'avons pas affaire à une thermodynamique des processus irréversibles loin de l'équilibre, le deuxième principe en faveur de la croissance entropique risque de ne pas prospérer. Ainsi, il affirme :

> There is no doubt that the second law of thermodynamics is a great contribution to the development of science and applied widely many aspects. However, the basis of thermodynamics is statistics (…) For isolated systems, which are only approximation, various

[109]Ilya Prigogine and Isabelle Stengers, Order out of chaos, Man's new dialogue with nature, A Bantam Book, 1984, *Op. Cit,* p. 141

[110] Ilya Prigogine and Isabelle Stengers, Order out of chaos, Man's new dialogue with nature, *Idem*, p.143

internal interaction must neglected, they must be thermal equilibrum processes, thereby no phase transition. [111]

Or si le deuxième principe fait faillite, il est probable que nous tombions soit dans le troisième principe où l'entropie décroît supposément vers le zéro absolu à cause des contraintes de température basse, soit nous tombons sur le quatrième principe à cause des fluctuations du milieu. Dans les deux cas, il s'agit d'une thermodynamique non linéaire de non-équilibre avec décroissance de l'entropie. Revenons à notre cas de figure pour illustrer comment les contraintes de l'environnement extérieur finissent par créer des structures dissipatives due à une forte production d'entropie décroissante

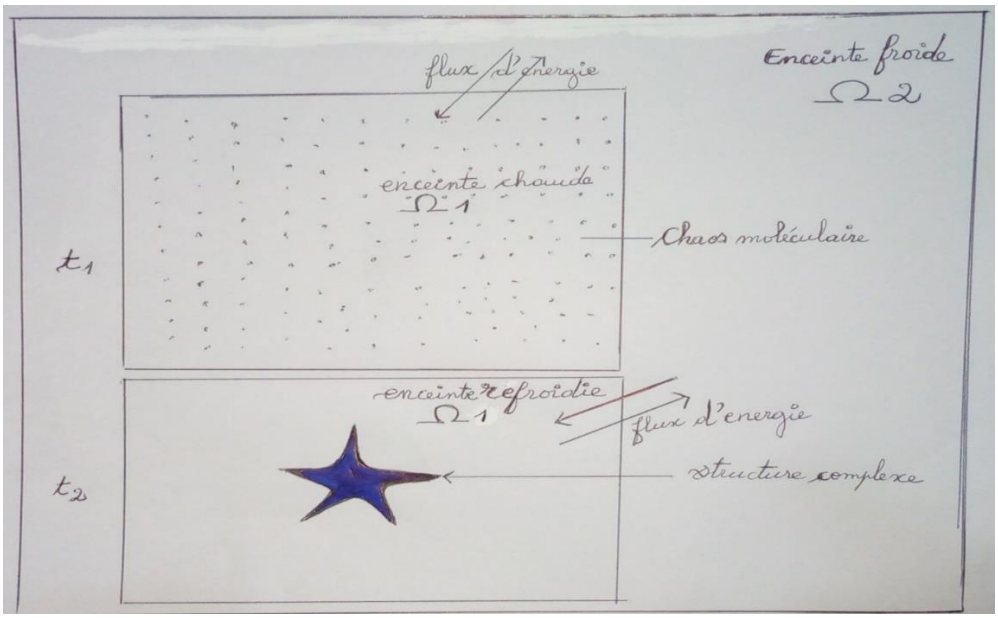


Figure 5 : illustration d'une différence entre un système à l'équilibre présentant un maximum entropique et un système loin de l'équilibre présentant un minimum entropique générant une structure complexe.

Plus haut, à l'instant t_1, le système est dans un état de chaos moléculaire avant l'interaction avec son environnement froid. Plus bas, à l'instant t_2, on observe la formation d'une structure dissipative imposée par les contraintes issues du milieu extérieur obligeant le système à s'éloigner de l'équilibre thermodynamique. La structure dissipative du système Ω_1 à l'instant $t_2$brise la symétrie spatiale de l'instant t_1, et le phénomène est irréversible à cause des processus dissipatifs qui accompagnent l'expérience.

[111]Yi Fang Chang, *Entropy decrease in isolated systems: theory, facts and test,Op.Cit.* p.16-24.

Au demeurant les systèmes ouverts et fermés permettent de sortir de la croissance entropie exclusive dictée par le second principe pour s'ouvrir à d'autres formes de productions d'entropie au rang desquelles la production du minimum entropique.

3.1.2. Enthalpie et entropie : rapports et implications thermodynamiques

Il est question ici d'introduire une notion importante dans les systèmes ouverts, aux côtés de l'entropie. C'est la notion d'enthalpie. On pourrait bien se demander l'intérêt de ce rapprochement.

En effet, nous voulons voir les incidences mutuelles de chacun de ces principes sur l'autre. La question qui constitue le fil d'ariane de cette articulation de notre réflexion est de savoir si la baisse d'enthalpie ou sa croissance impacte sur la baisse ou la croissance de l'entropie. Pour cela, il voudrait définir l'enthalpie et voir comment elle se comporte dans le cas des systèmes ouverts et fermés.

Nous pouvons définir l'enthalpie du point de vue des calculs comme une fonction qui synthétise en une seule fonction l'énergie totale d'un système thermodynamique. Tout comme l'entropie, l'enthalpie est une fonction d'état, c'est-à-dire qu'elle ne tient compte de l'état initial et de l'état final. Ainsi, nous pouvons le lire dans le manuel de physique écrit par Eric Brunet ce qui suit : *« Une fonction d'état est une fonction dont la valeur dépend seulement de l'état (macroscopique) du système, et non pas de son histoire. »*[112] C'est pourquoi l'enthalpie ne dépendra que des états initiaux et finaux. L'enthalpie est une fonction notée H qui est la somme de toutes les énergies contenues dans le système à pression constante. En physique, l'enthalpie s'obtient par la somme de l'énergie interne et le produit de la pression et du volume. C'est pourquoi son expression mathématique est H=U+PV. En d'autres termes, si l'énergie interne mesure uniquement l'énergie cinétique et l'énergie potentielle, l'enthalpie les synthétise toutes en une seule fonction. Nous pouvons lire dans *Wipédia* que :

> Toute substance impliquée dans une réaction contient une certaine quantité d'énergie interne. En effet, lors de la formation d'une particule de la matière, que ce soit un atome ou une molécule, cette quantité d'énergie est accumulée. Cette énergie se trouve sous la forme :
>
> - d'énergie cinétique liée au mouvement des électrons autour du noyau et au mouvement des molécules et des atomes (vibration, rotation, translation).

[112]Éric Brunet, Thierry Hocquet , Xavier Leyronas, *Cours de thermodynamique*, Sorbonne, 2019,*Op.Cit,* p.26

- d'énergie potentielle provenant des forces d'attraction entre les nucléons, entre les noyaux et les électrons, au niveau des liaisons chimiques entre les atomes, et dans les interactions moléculaires.

La somme de toutes ces énergies correspond à l'enthalpie de la substance. [113]

Lors d'une transformation, il s'agit de déterminer la variation d'enthalpie. Cette variation d'enthalpie est donnée par la formule $\Delta H = \Delta U + \Delta PV$. Or, la détermination de l'énergie interne n'est pas facile à déterminer par des manipulations expérimentales contrairement à la pression et au volume qui sont mesurables comme on peut le lire dans Wikipédia *« cependant il est difficile de déterminer expérimentalement l'énergie interne d'une substance. »*[114]Alors, il revient à calculer une mesure notée Q_P qui correspond à la quantité de chaleur absorbée ou rejetée. Alors, on écrira : $\Delta H = Q_P = \Delta U + P\Delta V$. C'est pourquoi on dit que l'enthalpie correspond à une quantité Q_P absorbée ou rejetée lors d'une transformation à pression constante. Plus simplement dit, l'enthalpie sera définie comme la quantité d'énergie qu'un système doit dégager ou absorber à pression constante pour être à température constante. C'est dans cette mesure que l'enthalpie est plus intéressante pour les transformations isobares, c'est-à-dire à pression constante, pour les transformations isochores, c'est-à-dire, à volume constant, et pour les transformations isothermes c'est-à-dire à température constante. C'est cette chaleur dégagée ou absorbée que l'on appelle variation d'enthalpie correspondant donc à la variation de l'énergie totale du système, car ce système va, soit dissiper son énergie dans l'environnement, soit récupérer de l'énergie dans l'environnement. Lorsque l'énergie est dégagée, la réaction (si on est chimie) ou la transformation (si on est en physique) se fait dans le sens de l'intérieur vers l'extérieur. On parle de réaction ou transformation exothermique avec augmentation d'enthalpie (on note H positif). Et, si la réaction ou la transformation se fait en absorbant de l'énergie, le sens sera de l'extérieur vers l'intérieur, on parle de transformation endothermique, avec une diminution d'enthalpie (note H négatif).

Tout ceci a un rapport avec l'entropie a un rapport avec l'entropie. Et cela nous ramène au débat du comportement de l'entropie dans un système ouvert. Nous pouvons établir que l'entropie d'un système ouvert tributaire de l'enthalpie de ce système. Donc dans un système ouvert caractérisé par une transformation endothermique où l'enthalpie du système diminue nécessairement, l'entropie de ce système diminue aussi nécessairement. Par contre, dans un

[113]www.allopropf.qc.ca.chimie
[114]*Ibidem*

système ouvert caractérisé par une transformation exothermique où l'enthalpie du système augmente, l'entropie de ce système augmente aussi nécessairement.

Si nous revenons un tant soit peu sur le cas de figure évoqué plus haut entre un système Ω_1 chaud à une température de T_1 de 30° Cet un système Ω_2 àT_2 de0° C. Nous avons dit que la formule pour calculer sa variation d'entropie était $\Delta S=\frac{Q}{T}$. Et l'entropie totale du système était : $\Delta S_{totale} = \Delta S_1+\Delta S_{2.}$ Cette expression pouvait encore s'écrire :

$$S_{totale} = -\frac{Q}{T1}+\frac{Q}{T2} \Leftrightarrow Q\left(-\frac{1}{T1}+\frac{1}{T2}\right)$$

La chaleur dégagée ici correspond à l'expression (-Q) que dégage le système Ω_1 pour se retrouver à égale température avec le système $\Omega_{2.}$ Nous pouvons vérifier fort de la formule de l'enthalpie que l'énergie totale du système aura diminuée car une partie de l'énergie s'est échappée sous forme de chaleur (-Q) dégagée par le système Ω_1. D'où une variation de l'énergie totale du système $\Omega_{1.}$ Cela va impacter sur le rapport pression-volume, par le fait que le volume qui est l'espace occupé par la quantité de matière qui constitue le système sera réduit et réduisant en même temps la pression. On retrouve donc la formule : $\Delta H= Q_P = \Delta U+ P\Delta V$. Or, lorsque la pression baisse et la température en même temps, on est sûr et certain que l'entropie baisse, parce que la pression mesure les effets au bord du système alors que la température mesure le degré des interactions des particules entre elles. La réduction des deux variables montre à suffisance que le système s'est refroidit et que le système est plus ordonné qu'à l'état initial. Ce qui est une autre façon de parler de la production d'une entropie négative. Nous pouvons conclure que l'entropie a diminué avec la diminution d'enthalpie exprimée par la chaleur dégagée (–Q) qui représente Q_P dans la formule de la variation d'enthalpie. Cela étant vrai, nous pouvons dire que, dans les systèmes ouverts, l'enthalpie tout comme l'entropie peut varier de sens selon les transformations considérées. Si l'entropie dépend de la chaleur et de la température du système, l'enthalpie elle dépendra de l'énergie totale, c'est-à-dire, de l'ensemble de toutes les énergies du système auxquelles on ajoute le produit de la pression et du volume. Mais, les comportements des deux sont mutuellement déductibles, à savoir : l'augmentation de l'une des deux grandeurs implique celle de l'autre, et vice versa. Tout comme la diminution de l'une implique l'autre. Quand nous sommes en face d'une réaction endothermique, sans calculer les paramètres, nous pouvons

déduire que l'entropie augmente car l'enthalpie augmente par absorption de la chaleur. Et dans le cas d'une transformation exothermique, nous pouvons déduire sans calculer les paramètres que l'entropie diminue car l'enthalpie de ce système diminue par dégagement de la chaleur contenue dans le système.

3.1.3. Systèmes ouverts et généralisation

Nous avons dit plus haut que les systèmes ouverts sont, en fait, les systèmes réels qui constituent la thermodynamique. Cela nous permet de rappeler que les systèmes isolés au sens propre n'existent pas, comme nous l'avons déjà signalé. Ils sont simplement des approximations ; le seul vrai système isolé, selon le modèle standard de la physique, étant l'univers lui-même puisqu'on suppose que l'univers est une singularité physique qui englobe tout ce qui existe. Revenant donc sur les systèmes isolés à l'échelle locale, il n'est plus à démontrer que la matière est essentiellement structurée et si poreuse qu'elle laisse toujours passer des particules infiniment petites quel que soit le degré d'isolement. Il est important de noter que nous parlerons souvent indifféremment de systèmes ouverts et fermés, car la différence n'est pas strictement grande, sauf lorsque les contraintes exigent que nous spécifiions les choses. En plus, un système ouvert peut être étudié comme un système fermé. Prenons un cas : un système ouvert en état stationnaire (la même quantité de matière qui entre est la même quantité qui en ressort) est traversé par un flux de matière. Si on considère le système à l'instant *t* avec tout ce qu'il contient, on notera que cette quantité de matière est stable et ne varie donc pas dans tout le système concerné. Ce système à cet instant peut être étudié comme un système fermé, car il n'échange pas de matière avec l'extérieur bien qu'il échange de l'énergie ou de la chaleur. Le système est donc fermé car sa masse ne varie pas alors que sa chaleur et son énergie interne varient. De façon générale, les systèmes ouverts sont donc omniprésents et chaque système peut être considéré comme un système ouvert selon les conditions d'étude. Pour le système fermé, nous avons vu qu'il peut être considéré à un moment donné comme un système ouvert. C'est le même cas avec le système isolé qui échange de façon infinitésimale avec le milieu extérieur. Donc, tout ce que nous avons dit du système ouvert peut être appliqué à l'échelle infinitésimale au système isolé, à la seule différence qu'à un moment donné, on peut décider d'ignorer les influences très petites issues de l'environnement extérieur. Mais, nous ne devons pas oublier le phénomène de l'effet papillon qui est très présent dans les systèmes quantiques. En effet, ce sont des systèmes très sensibles aux moindres

perturbations venant de l'environnement. Et un moindre changement de paramètres pourrait déterminer l'évolution future du système. Cela dit une moindre perturbation, fusse-elle très petite voire négligeable venant de l'extérieur d'un système *approximativement* isolé, peut engendrer des effets considérables tel que le stipule la théorie de l'effet papillon. L'*effet papillon* qui est une théorie du météorologue Edward Lorentz est une métaphore qui met au goût du jour la sensibilité aux conditions initiales dans un système quantique de nature chaotique. Sur Wikipédia, on peut lire ceci : [l']« *Effet papillon* est une expression qui résume une métaphore concernant le phénomène fondamental de sensibilité aux conditions initiales de la théorie du chaos. La formulation exacte qui en est à l'origine fut exprimée par Edward Lorentz lors d'une Conférence scientifique en 1972. »[115]. L'*effet papillon* stipule que les battements d'ailes d'un papillon au Brésil peuvent provoquer une tornade au Texas. L'idée est de montrer que les petites causes produisent rapidement de grands effets. Revenant sur notre réflexion, une perturbation venant de l'extérieur du système isolé, dont on a négligé les effets, soi-disant que les frontières étaient adiabatiques, finit par créer des effets inattendus. Ce que les physiciens appellent souvent bruits de fond omniprésents dans le système et d'origine indéterminée, peut bien provenir des influences impondérables définies négligeables à cause de leur insignifiance. Seulement, dans l'univers quantique hypersensible, ces petites causes produisent de grands effets. C'est ainsi que nous avons vu plus haut qu'un système isolé peut spontanément baisser son entropie. Nicolis Grégoris et Ilya Prigogine affirment ceci :

> La plupart des systèmes sont en contact avec un environnement complexe, un tel environnement leur communique continuellement de la matière, de la quantité de mouvement ou d'énergie de telle sorte qu'il devient pratiquement impossible de contrôler les variables d'état quelles qu'elles soient, avec une précision illimitée. Tout expérimentateur a ressenti plus ou moins cette frustration et les expressions « d'erreur expérimentale » ou « d'intervalle de confiance » ne font que refléter l'ingérence de l'environnement dans la dynamique intrinsèque du système.[116]

L'environnement influence donc toujours le système étudié même quand on essaie de l'écarter. Prenons un cas : un système dit isolé sur lequel on réalise des expériences répétées dans les mêmes conditions. Les résultats sont les mêmes avec des petites différences infinitésimales qui auront des effets croissants sur un long temps comme dans le cas de *transformation du Boulanger* où le système, parti d'un point très petit finit par *perdre la mémoire*[117] à mesure que

[115]fr.m.wikipédia.org/wiki/E du21 août 2023
[116]Grégoris Nicolis et Ilya Prigogine, *A la rencontre du complexe*, PUF, Paris, 1989,*Op.Cit* p. 88.
[117] On ne plus pas remonter l'histoire de ce système ou la retracer car la répétition

l'expérience est répétée. A la fin, on ne peut plus expliquer le point initial. Nous pouvons exprimer ce fait de façon mathématique en simulant un système S et X l'état instantané de ce système. Mais nous dirions qu'en réalité X_s n'est pas l'état du système, mais plutôt une valeur de X liée à X_s tel que $X=X_s+x(t)$. La valeur x(t) est considérée comme une perturbation infinitésimale sensée être ignorée dans les calculs, provenant peut-être du milieu extérieur par-delà les frontières supposément adiabatiques. Tout ceci nous montre qu'on ne peut pas, en réalité, isoler un système. On ne peut que l'isoler dans nos pensées. Mais dans les situations réelles, tous les systèmes sont ouverts. Cela ressemble étrangement à ce que disait Pierre Henri Poincaré, parlant des systèmes non-intégrables. Les systèmes non-intégrables sont des systèmes à n corps dont les trajectoires ne peuvent plus être plus régulières comme le système Soleil-Terre-Lune qui est un système à trois corps. Il affirmait qu'un système non-intégrable a beau sembler être régulier sur une longue période, il finit par s'écarter de la trajectoire. Un mouvement chaotique peut paraitre stable durant des centaines de millions d'années avant de constater qu'il était chaotique et qu'il peut sortir de son îlot de stabilité. En faisant un parallèle avec les systèmes isolés, nous pouvons affirmer qu'un système peut paraître isolé pendant de millions d'années avant de constater qu'il était ouvert et qu'il peut sortir de son îlot d'isolement.

Cela dit, tous les systèmes sont des systèmes ouverts qu'on ignore. De fil en aiguille, ils finissent par engendrer les effets connus des systèmes ouverts. Donc, l'entropie des systèmes thermodynamiques finirait finalement par décroître au fil du temps car ces systèmes sont en contact d'une manière ou d'une autre avec l'environnement. De plus, quelle que soit la frontière artificielle voire naturelle imposée à un système, cette barrière finit par connaitre l'usure. Au vu de cela, on pourrait dire que l'on peut essayer d'isoler un système pendant un temps *t*, le temps nécessaire pour qu'une expérience soit réaliser mais après la nature reprend ses formes. Le système isolé serait donc un système artificiel, créé par l'homme pour imiter le système universel dans lequel il vit et réaliser une expérience de laboratoire impossible dans l'ordre naturel des choses. Dans la nature physique ou dans les situations réelles, on n'a affaire qu'à des systèmes ouverts.

Tout compte fait, puisque les systèmes ouverts sont des systèmes où l'entropie peut prendre toutes les directions, on peut arriver à la conclusion que le sens de l'entropie locale dépend simplement des contraintes extérieures imposées au système étudié. On peut trouver des

systèmes à entropie décroissante ou croissante puisque l'entropie d'un système ouvert peut bien connaître les deux évolutions selon les contraintes issues des deux systèmes. Nous retenons par ailleurs que ce qu'on appelle système isolé n'est qu'un cadre expérimentale valable sur un temps car même les frontières finissent par céder et le système devient vulnérable à la pénétrabilité quantique. De plus, le principe lui-même d'isolément est une approximation. Ce qui nous amène à conclure que si l'on veut généraliser les systèmes thermodynamiques, cela ne peut que se faire par généralisation des systèmes ouverts, que l'on peut trouver partout. Car même si on isole un système, il serait difficile de lui éviter les effets de la gravitation. Deux masses isolées s'attirent mutuellement l'une l'autre, comme le stipule la loi de la gravitation universelle de Newton

$$F = G\frac{m1m2}{d2}$$

Donc, un système a beau être isolé, il n'échappe pas à la gravitation qui est une loi universelle. Puisqu'il subit une interaction gravitationnelle dans leur ensemble, les particules seront entrainées dans cette attraction gravitationnelle ; ce qui va rendre les systèmes sensibles à des forces exogènes (notamment la gravitation), malgré leur isolement. Imaginons deux systèmes isolés suffisamment massifs pour que l'effet gravitationnel soit perceptible ; les deux systèmes sont situés à des points différents de l'espace, soit de point O_1 et O_2, leurs centres de gravité. On remarquera que, plus leur distance diminue plus leur attraction mutuelle augmente, car la force gravitationnelle est inversement proportionnelle à la distance et proportionnelle aux masses des corps qui participe à l'expérience. A un moment donné les deux corps massifs vont commencer à se céder mutuellement des éléments libres sous l'effet de la gravitation. Cela est vrai même si les systèmes sont isolés. Son contenu interne aura tendance à être également attiré du côté où s'exerce la force gravitationnelle.

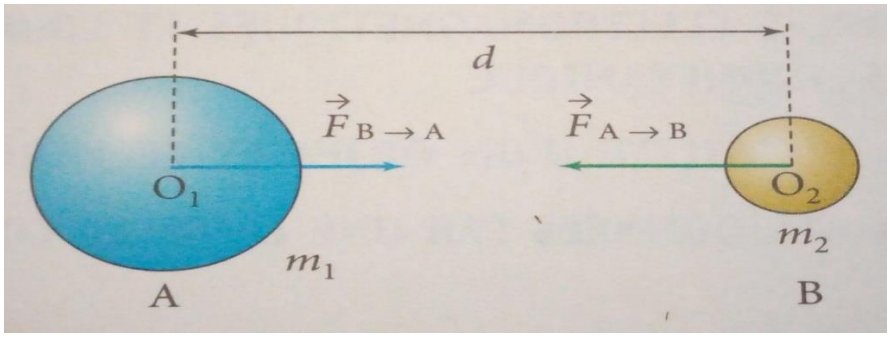


Figure 6 : Illustration de l'interactionnelle gravitationnelle entre deux grands systèmes. Les systèmes sont supposés isolés mais la loi de la gravitation de Newton reste valable pour les deux grands systèmes

En définitive, il conviendrait de noter que tout système subit des influence extérieures ou exogènes qui impactent, de manière perceptible ou imperceptible, sur son comportement. Mais, il peut arriver qu'on décide d'ignorer parfois de faibles paramètres pour simplifier les calculs. Or, on oublie que l'univers chaotique quantique est très sensible à la moindre perturbation. Donc, ce qu'on a négligé peut bien troubler l'expérience et aboutir aux grands effets, comme nous l'avons vu plus haut avec la transformation du Boulanger ou l'effet papillon où les petites causes produisent de grands effets. Pour clôturer cette réflexion, nous pouvons dire que les systèmes ouverts sont omniprésents. Ils sont la règle et les systèmes isolés sont l'exception. Une exception obtenue, non pas par la satisfaction des conditions strictes et rigoureuses qui s'imposent, mais une exception obtenue par accord des esprits, c'est-à-dire convention entre les expérimentateurs de considérer un système X comme isolé après avoir négligé un certain nombre de paramètres. Dans Wikipédia on peut lire ceci : *« Des systèmes véritablement isolés n'existent pas dans la réalité physique. Il y a toujours des interactions avec l'environnement (exemple de la gravité opérant entre la masse du système et les masses extérieures). Cependant, un système réel peut se comporter comme un système isolé avec une bonne approximation »*[118]

3.2. Des systèmes vivants

3.2.1. De la physique à la biologie : nécessité d'une bio-thermodynamique

Jusqu'ici, nous n'avons fait que parler de la thermodynamique dans le cadre de la physique où elle a vu le jour. Mais, la thermodynamique va au-delà de la physique aujourd'hui. Elle déborde le cadre de la physique d'où elle a émergé. C'est grâce à cette extension qu'elle a pu compléter certains principes et pris en compte certains systèmes. En effet, si la thermodynamique, à un moment donné, s'est bâtie autour du deuxième principe en faveur de la croissance de l'entropie, donnant en même temps l'impression que l'entropie devait essentiellement être croissante ou nulle ($S \geq 0$), c'est en raison du fait que, jusqu'à une époque, celle-ci ne fut développée que par les physiciens et notamment dans le domaine de la théorie cinétique des gaz. Et si on s'en tient à la théorie cinétique des gaz dans un système isolé, le deuxième principe est bel et bien une loi presque infaillible. C'est ce que nous rapporte Yi-Fang Chang lorsqu'il affirme que : « *The second law of thermodynamics must be thermal equilibrum*

[118] Systèmes isolé in https:// fr.m.wikipedia.org

processes, so, which have not phase transformations. In various phases and transformations, only gas diffusion agrees best with the second law of thermodynamics. »[119]Donc, si la théorie cinétique des gaz est celle qui valide, pour le mieux, le second principe, et que cette cinétique des gaz est une théorie physique, on peut arriver à la conclusion que le second principe, en faveur de l'augmentation d'entropie, est un principe qui se fonde sur la physique où elle absente la décroissance d'entropie, rigoureusement parlant.

> La question de l'organisation biologique, de sa mise en place, de son évolution et de son maintien a été abordée sous des angles très variés : biologie moléculaire, génétique, système dynamique ouvert loin de l'équilibre, etc. Toutefois, un des aspects qui demeure les plus controversés est constitué par l'aspect thermodynamique : l'organisation biologique, en effet, peut être interprétée en termes d'entropie négative, concept absent de la physique (où l'entropie est définie, statistiquement parlant, à partir d'une distribution de probabilité et, macroscopiquement parlant, par le sens des échanges de chaleur)[120].

Cela dit, la physique n'ignore pas que l'entropie peut décroître de façon générale, mais elle maintient que certains principes ne sauraient être violés, à l'instar du sens de l'évolution spontanée de la chaleur qui va toujours du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid, en augmentant l'entropie du système, même si la température du milieu extérieur, beaucoup plus basse par exemple, va l'emporter au final, donnant lieu à une décroissance sur l'ensemble. La question que l'on peut se poser est celle de savoir ce qu'il en est des autres domaines scientifiques autres que la physique. Cette interrogation nous permet de passer de la physique à la biologie.

Tout compte fait, si la physique nous a habitués à traiter de la matière inanimée ou morte, la biologie, elle, nous permet de traiter de la matière vivante. Avec la biologie, il est donc question de parler des systèmes vivants. Qu'entend-t-on par systèmes vivants et quelle sorte d'entropie développent-ils ?

Pour bien comprendre la particularité des systèmes vivants, il faudrait partir des acquis physiques relatifs aux systèmes ouverts. Nous avons dit plus haut que les systèmes ouverts sont des systèmes qui communiquent avec leur environnement à travers les échanges de matière et d'énergie. De ce point de vue, nous pouvons dire que les systèmes vivants sont des systèmes ouverts, même si nous établirons, par la suite, des spécificités qui font la différence. A ce propos,

---

[119]Yi Fang Chang, *Entropy decrease in isolated systems: theory, facts and test,Op. Cit*. p.16-24

[120]Francis Bailly et Giuseppe Longo, *Organisation biologique et entropie negative : A partir des réflexions de Schrödinger*, Partie II du texte présenté en anglais à la Conférence : "From Type Theory to Morphological Complexity: A Colloquium in Honor of Giuseppe Longo", Paris, June 28-29, 2007.

Yi-Fang Chang affirme que : *« A living being as a whole represents an extermely orderly state of being and must be an open system for long time. »*[121]Donc, un système vivant est donc d'abord un système ouvert qui, grâce à des fonctions biologiques bien précises, établit des échanges avec l'environnement extérieur pour assurer le maintien de son organisation. Nous pouvons penser, de ce fait, que les systèmes ouverts sont des systèmes qui font jaillir l'ordre à partir du désordre, comme le souligne Prigogine dans un célèbre traité intitulé *order out of chaos* où il montre que les systèmes ouverts développent une thermodynamique non-linéaire de non-équilibre qui fait jaillir des structures dissipatives consécutivement à l'auto-assemblage de la matière dans ledit système. Dans un autre angle, nous pouvons dire que les systèmes vivants, contrairement aux systèmes ouverts, sont des systèmes qui font jaillir *l'ordre à partir de l'ordre*. Car, comme cela est souvent repris en en bio-thermodynamique, la vie a horreur de l'entropie. Donc, les systèmes vivants sont, en plus d'être des systèmes ouverts, des systèmes qui tentent, par surcroît, de maintenir leur organisation. D'où le principe de l'ordre qui jaillit de l'ordre. Nous pouvons parodier Prigogine en disant que les systèmes vivants sont des systèmes qui répondent au principe *order form order*. Il faut donc que les deux principes soient vérifiés, à savoir : l'organisation et la lutte pour son maintien. Francis Bailly et Giuseppe Longo ajoutent que *« Schrödinger développera des considérations aussi préliminaires qu'audacieuses, basées sur un regard porté sur l'organisme dans sa globalité. Son idée est que, ce qui compte dans un être vivant c'est son organisation et que le problème qui se pose n'est pas seulement sa mise en place (l'établissement d'un « ordre à partir du désordre »), mais aussi son maintien (« l'ordre à partir de l'ordre). »*[122]Or, il est établi que, plus on s'éloigne de l'équilibre thermique qui est synonyme d'entropie maximale (S=0), plus l'entropie diminue et la matière a tendance à s'auto-assembler et à s'auto-organiser. Si le système vivant correspond donc à l'ordre et à son maintien, cela signifie simplement que le système vivant développe une entropie négative. Cette entropie négative s'effectue par l'apport nutritif qui provient de l'environnement et qui sera exploité par les cellules sous forme d'énergie chimique pour effectuer les fonctions métaboliques qui auront pour effet de faire diminuer l'entropie pour maintenir l'organisation d'ensemble du dudit système. Francis Bailly et Giuseppe Longo poursuivent en disant que *« [Schröndiger]souligne l'importance, à nos jours, encore peu claire, de l'apport d'organisation, en tant qu'entropie négative, y compris par*

[121]Yi-Fang Chang, *Entropy decrease in isolated systems, Op.Cit.*
[122]Francis Bailly et Giuseppe Longo, *Organisation biologique et entropie negative, op.cit.*

la nourriture. Cet apport participerait à la tension continuelle entre la croissance de l'entropie, propre à tout processus thermodynamique irréversible, qui engendre du désordre, et le maintien de l'ordre »[123]. Cet apport nutritif (ou plus simplement la nourriture) est récupéré par les moteurs moléculaires qui sont de petits moteurs qui se trouvent dans les cellules vivantes et qui effectuent des travaux mécaniques de métabolisme cellulaire. Joël de Rosnay affirme ceci :

> Pour lutter contre les effets de l'entropie énergie "usée"-, et éviter ce nivellement énergétique qui est la mort, la cellule a donc un besoin constant d'énergie "fraîche". Cette énergie est continuellement empruntée à l'extérieur sous forme d'aliment ; c'est ce qui explique pourquoi tout être vivant - même le plus simple - est obligé de se nourrir. La cellule a également besoin d'énergie pour accomplir un certain travail. Ainsi, quand elle se meut à l'aide de flagelles ou de cils, quand elle se contracte, elle effectue un travail mécanique. [124]

Tout se passe comme avec les moteurs macroscopiques, à la seule différence que ces infimes moteurs moléculaires fonctionnent comme le moteur de Carnot. Ils ont presqu'une efficacité de 100% de rendement. Ce qui signifie qu'ils ne connaissent pas les pertes dues aux forces mécaniques identifiées à l'origine par James Watt qui estime que son moteur ne saurait avoir un rendement maximal. Mais, avec les moteurs moléculaires, c'est tout le contraire. Ils réalisent plutôt le cycle de Carnot. Une question vient tout de suite à l'esprit : comment cela est-il possible quand on sait que le moteur de Carnot est une idéalisation, étant donné qu'aucun moteur, en situation réelle, ne peut avoir un rendement maximal à cause des forces mécaniques qui sont des forces dissipatives ?

En effet, s'il existe des interactions permanentes dans un système, ce système produit une énergie potentielle. D'ailleurs, l'une des définitions connues pour l'énergie potentielle est bien l'énergie due aux interactions. Imaginons donc un système dont les interactions sont maintenues au même niveau, ce système aura toujours une énergie potentielle uniforme et produira toujours le même travail, son énergie cinétique aura tendance à diminuer pour laisser place à l'énergie potentielle. Yi-Fang Chang affirme: « *When internal interaction in an isolated system exists, ie., the kinetic energy is transformed into potential energy, then the order increases, the kinetic energy and entropy decrease.* » A partir de là, un système, fusse-t-il isolé peut violer le deuxième principe. C'est ce qui se passe avec les moteurs moléculaires. Ce sont des moteurs qui puisent l'énergie chimique des cellules pour la transformer en énergie mécanique dont l'efficacité est presque de 100% de rendement. Et l'apport nutritif permet de stocker l'énergie chimique dans les

[123] Francis Bailly et Giuseppe Longo, *Organisation biologique et entropie negative, Idem.*
[124]Joël de Rosnay, *Les origines de la vie, de l'atome à la cellule*, Seuil, Paris, 1966, pp. 47-48

cellules. Yi-Fang Chang affirme: *« the molecular motor takes a very important role for keeping high order in biologic systems. We think, the molecular motor corresponds to dS<0, in which the chemical energy of cell translates into mechanical energy, whose efficiency is almost 100%. »*[125]

En fin de compte, il y a une situation presque cocasse due à la régénération d'énergie qui se produit, en ce sens que l'efficacité du travail est presque maximale alors que l'entropie, elle, reste minimale. Le système vivant est donc un moteur de 100% d'efficacité avec une conservation d'entropie minimale grâce aux interactions persistantes internes au système, ce qui lui évite de virer au désordre. Par ailleurs, le désordre survient quand le système vivant commence à décliner sous le coup de l'inconfort (la maladie, la mort etc.) qui vient perturber l'ordre dans le système pour installer le désordre. Dans ce cas le système risque de se transformer en un simple système ouvert perdant son animation pour devenir un système inanimé comme les systèmes physiques. Pour parer à cela, le système doit impérativement baisser son entropie pour revenir à un système vivant voire à un système biologique. Sinon, il atteint le maximum entropique qui est synonyme de mort thermique, ce qui correspond en biologie à une cessation des fonctions vitales. Yi-Fang Chang affirme à ce propos que : « *The declining process of life is from order to disorder, and entropy increases. The origin, birth and developed process of life must be from disorder to order ; and information increases. Both middle processes are the dissipation structure, and entropy is invariant. This is the total principle, which shows the relation between entropy decrease and life science.* »[126]

Si le système vivant peut donc être définie par rapport à la décroissance entropique, il est possible de parler des problèmes rencontrés dans un système vivant comme des problèmes liés à une croissance entropique. C'est le cas des pathologies et autres accidents. Plusieurs thérapies sont d'ailleurs proposées à partir du principe de diminution de la production entropique pour remédier aux pathologies. C'est ce que confirme Yi-Fang Chang lorsqu'il déclare que : *« A living being death's represents a transformation to a state of total disorder, while sickness is a state of local disorder and state of recovering from sickness is marked by a return to the higher order of health. The order parameters are thus health targets […] we propose entropy decrease as an index of therapeutics in biophysics, and believe that the biothermodynamicis will make with*

[125]Yi Fang Chang, *Entropy decrease in isolated systems: theory, facts and test,Op. Cit.*
[126]Yi Fang Chang, *Entropy decrease in isolated systems: theory, facts and test,Op. Cit.*

great contribution for the test of development on thermodynamics of entropy decrease ».[127]La décroissance entropique est donc nécessaire pour le maintien de la vie qui se veut être la conséquence d'une organisation qui lutte pour son maintien. Cela nous permet d'aboutir à la conclusion selon laquelle, la décroissance entropique est partagée dans tous les systèmes vivants qui sont, en réalité, de petits univers organisés avec une thermodynamique particulière, à savoir la bio-thermodynamique qui a horreur de l'entropie croissante. Pour ce faire, les systèmes vivants se servent des apports nutritifs pour recharger leurs cellules d'énergie chimique dont se servent les moteurs moléculaires pour la transformer en énergie mécanique afin d'effectuer des fonctions métaboliques.

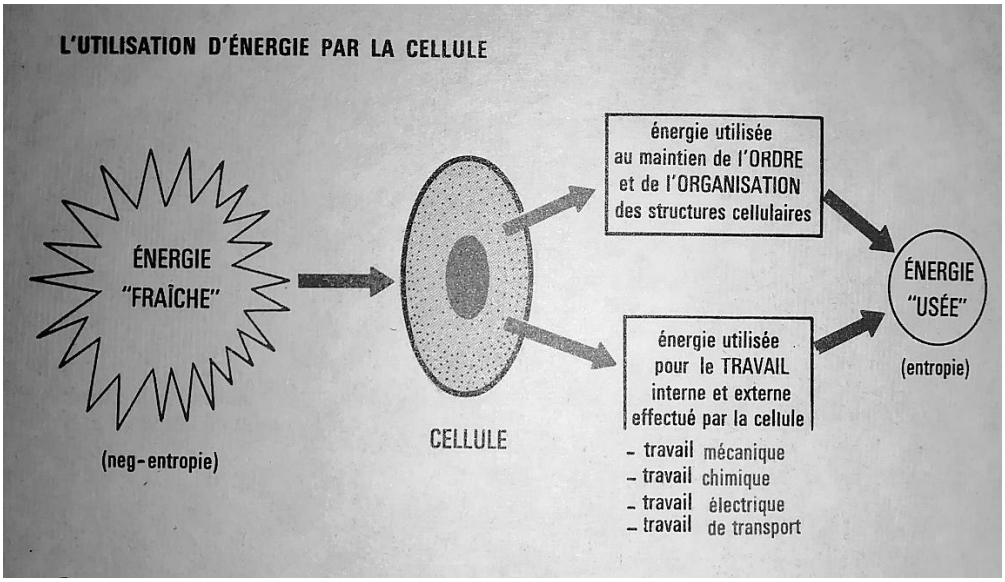


Figure 7 : illustration du cycle d'utilisation de l'énergie par la cellule en tension entre néguentropie et entropie pour le maintien de son organisation.[128]

Dans la figure ci-dessus, l'énergie fraîche est due à l'entropie négative nécessaire pour la réalisation des fonctions vitales. Le moteur moléculaire se trouve à l'intérieure de la cellule et effectue un travail mécanique, chimique, électrique et de transport. L'énergie usée est expulsée. Cela montre que l'on doit également inclure la fonction d'élimination qui permet de réduire le maximum entropique en l'expulsant hors du système vivant afin de permettre à ce dernier de ne pas se retrouver en situation d'entropie maximale qui est fatale pour le vivant. Cette fonction

[127] « "

[128] Figure tirée de livre de Joël de Rosnay, *Les origines de la vie, de l'atome à la cellule*, Seuil, Paris, 1966, p. 48.

permet donc au système vivant de s'éloigner de l'équilibre thermodynamique. Erwin Schrödinger affirme :

> When a system that is not alive is isolated or placed in a uniform environment, all motion usually comes to a standstill very soon as a result of various kinds of friction; differences of electric or chemical potential are equalized, substances which tend to form a chemical compound do so, temperature becomes uniform by heat conduction. After that the whole system fades away into a dead, inert lump of matter. A permanent state is reached, in which no observable events occur. The physicist calls this the state of thermodynamical equilibrium, or of'maximum entropy'.[129]

Comme dans les systèmes ouverts, l'éloignement à l'équilibre, développé amplement par Ilya Prigogine dans son ouvrage intitulé *order out chaos,* permet de réduire l'entropie afin d''éviter la mort thermique. Cette mort thermique qui est l'équilibre des variables d'état intensives oblige au système la cessation de toute activité d'échange entre le système et le milieu. Ce qui correspondrait à la mort biologique. En effet, la particularité du système vivant est cet échange qui lui permet d'assurer les fonctions métaboliques. C'est dans ce sens que Erwin Schrödinger définit-il un *système mort* comme un système qui n'échange plus avec son environnement même s'il reste ouvert : « *What is the characteristic feature of life? When is a piece of matter said to be alive? When it goes on 'doing something', moving, exchanging material with its environment, and so forth, and that for a much longer period than we would expect an inanimate piece of matter to 'keep going' under similar circumstances.* »[130]

3.2.2. De la physique à la chimie : nécessité d'un modèle physico-chimique

La physico-chimie est une science de la matière à cheval entre la physique et la chimie mais avec une prééminence de la physique. Les anglo-saxons la nomment *chemical physics.* De façon simple, on peut dire qu'elle étudie les liaisons chimiques des particules physiques. En quoi nous intéresse-t-elle dans cette étude ? Elle nous intéresse dans la mesure où, dans une évolution thermodynamique, c'est-à-dire une évolution d'ensemble de populations de milliards de milliards d'individus, les collisions, les chocs, les entrechocs et les corrélations qu'effectuent les particules physiques finissent par créer des liaisons chimiques (thermochimiques, électrochimiques,

[129]Erwin Schrödinger, *What is life ? The Physical Aspect of the Living Cell,* (first printing 1944), Cambridge University Press edition, 1967, p. 69.
[130] Erwin Schrödinger, *What is life ? The Physical Aspect of the Living Cell,* (first printing 1944), Cambridge University Press edition, 1967, *Idem*

photochimiques etc.), affectant le système et influençant nécessairement sa production d'entropie. Arrêtons-nous, un tant soit peu, à ce qui a lieu lors des collisions et des corrélations de particules.

Tout d'abord, nous pouvons remarquer que, ce que la physique appelle *corrélations de particules,* la chimie le nomme *liaisons*. Ces liaisons sont à la base de la formation de nouveaux corps. Deux particules corrélées vont créer une molécule. En chimie, elles forment un ion. Si ces particules ont des électrons de trop (un ou deux électrons de plus), l'ion ainsi obtenu est chargé négativement, on parle de cation. Si elles ont des électrons en moins, elles se mettent ensemble pour se compléter. Dans ce cas, elles sont chargées positivement, on parle d'anion. Ces liaisons tantôt appelées corrélations engendrent donc de nouvelles structures où les particules perdent ou gagnent des électrons. Les molécules peuvent également modifier les structures grâce à ces liaisons établies par les corrélations et collisions dans une évolution thermodynamique. Il y a donc une probabilité élevée de formation de nouvelles structures. Nous affirmions dans une précédente étude que *« ce sont des chocs, des entrechocs et des liaisons entre les particules élémentaires où celles-ci perdent et s'échangent des éléments. Les collisions et les corrélations créent donc des liaisons entre les particules élémentaires qu'elles transforment. »*[131]Cette transformation n'est pas seulement physique, c'est-à-dire, qu'elle correspond à la description des micro-états où passe le système pour avoir un macro-état final, selon la formule de l'entropie $S = Kb.ln\Omega$. Elle est aussi chimique comme l'atteste Isabelle Stengers quand elle affirme que « *c'est dans le domaine de la chimie que le « rôle constructif » des processus irréversibles se manifeste avec le plus de diversité »*[132] L'étude de ces nouvelles combinaisons entre les particules élémentaires engagées dans une évolution d'ensemble est, bel et bien, l'objet de la chimie. Ainsi, ce nouveau modèle où le comportement d'ensemble affecte le comportement individuel et vice versa, nous fait passer de la physique à la chimie.

Ainsi l'auto-organisation de la matière qui engendre des structures nouvelles chez Prigogine permet de comprendre cela. Une décroissance de l'entropie dans les systèmes thermodynamiques ouverts peut, bel et bien, faire que l'on passe d'un système désordonné à une structure d'éléments corrélés ou simplement à une structure organisée, du point de vue physique

[131]Jospin Brice FOE, *De la dynamique classique à la thermodynamique des processus de non-équilibre : une ontologie de la nature à partir de la physique, chez Ilya Prigogine* (mémoire), 2020, inédit, 2020, p 127.

[132]Isabelle Stengers in Universalis : rubrique consacrée à Prigogine.

et, en même temps, du point de vue chimique où de nouvelles liaisons s'établissent, modifiant la structure chimique des composés.

Reprenons un exemple de système$_1$ contenant un volume fini de gaz à une température T=0^o. En modifiant les conditions aux bords, à savoir : si on soumet ce même volume de gaz à des conditions très froides, qu'on appelle système$_2$ de température T<0, la structure évolue vers un état stationnaire. Et on obtient un flocon de neige, c'est-à-dire, une structure nouvelle. Et ce résultat est irréversible. On cesse d'assister à un chaos moléculaire. Les corrélations se sont créées entre les particules.

Essayons de résoudre l'énigme de la décroissance entropique dans ce système. Nous sommes en présence d'un système ouvert à cause du changement des conditions aux limites. (Le mixage du système$_1$ de température 0^o C et du système$_2$ de température T < 0 est possible en vertu du fait que le système$_1$ est ouvert, il peut donc échanger la chaleur et la matière avec le système t_2). Le système$_2$, considéré comme l'environnement, est plus froid que le volume de gaz de notre système$_1$ initial. Or, selon le premier principe de thermodynamique énonçant la conservation d'énergie, on a le bilan d'énergie : dU= dU_{sys+} dU $_{ext}$. Or, pour tout système thermodynamique, son changement d'entropie est $\Delta S = Q/T$. Donc, pour un système ouvert constitué de deux compartiments où le système S_1 (système intérieur) de température T= 0^o, et le système S2 (système extérieur) dont la température tend vers$-\infty$, le bilan entropique est $\Delta S = \Delta S1 + \Delta S2$. Or la formule de la variation entropique est de $\Delta S = Q/T$

Puisque nous avons deux entropies à savoir l'entropie intérieure et l'entropie extérieure (l'entropie extérieure apparaissant toujours avec un signe négatif), on aura $\Delta S = Q/T_1 + -Q/T_2$

$\Delta S = Q\ (1/T_1 - 1/T_2)$

$\Delta S = Q\ (T_2 - T_1/T1xT_2)$

$\Delta S = Q\ (-T_{1+}T_2/T1xT_2) < 0$ puisque T2 est inférieure à zéro.

Dans ce cas de figure où le bilan entropique est inférieur à zéro. L'entropie est décroissante et les éléments formant le système intérieur ont tendance à s'auto-assembler dans le sens de l'entropie au lieu de rester dans le chaos comme dans le cas de la croissance de l'entropie. Cela va favoriser la formation de nouvelles structures, comme l'atteste la figure ci-

dessous. L'expérience nous fait chevaucher de la physique vers la chimie sans nous en rendre compte.

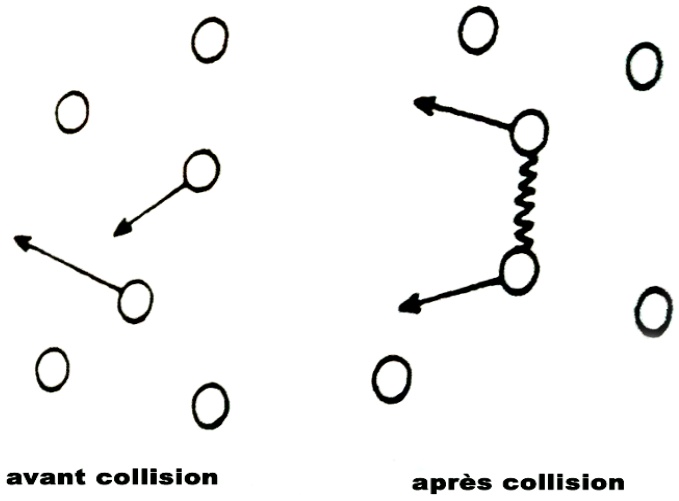


***Figure 8 : Illustration montrant que les corrélations de particules en physique sont en fait des liaisons en chimie*.**

Dans la figure ci-dessus, à partir d'un premier cas de figure qui consiste en deux particules isolées, nous sommes parvenus à un deuxième cas de figure qui établit une liaison entre les deux particules corrélées. La physico-chimie nous permet d'étudier les liaisons chimiques qui existent entre ces particules physiques. Cela ne survient pas par hasard, mais il émerge sous certaines conditions qui permettent aux particules de ralentir leur vitesse et d'effectuer des liaisons. Cela s'accompagne généralement d'une baisse de température dans l'enceinte et d'une diminution des interactions de particules (chaleur) permettant à ces dernières de s'auto-assembler. Pour les habitués de la thermodynamique, ces conditions rappellent bien les conditions d'une production d'entropie négative.

Le système vivant est le lieu par excellence d'activité physico-chimique par le fait qu'il développe une entropie négative très favorable à une acticité physico-chimique et par le fait qu'il fonctionne comme un vrai laboratoire contenant tout le nécessaire pour qu'il y ait ces opérations physico-chimiques, entre autres : des molécules (qui sont des entités physiques), des réactifs, des catalyseurs de réactions qui sont des entités chimiques. Un système désordonné, c'est-à-dire à entropie croissante effectuera moins une activité physico-chimique parce que les particules sont

moins corrélées. Alors qu'un système ordonné, c'est-à-dire, à entropie décroissante effectuera une plus grande activité physico-chimique à cause des liaisons de particules de plus en plus importantes. Le système vivant, qui est un système intelligent réussissant tout seul à réduire son entropie de façon continuelle, est le lieu des plus grandes activités physico-chimiques.

3.2.3. Néguentropie : paradoxe entropique ou nouvelle catégorie à part ?

Le terme néguentropie s'est imposé au fil de l'histoire des idées en science. Il a été le fruit de beaucoup de controverses comme d'habitude entre les savants notamment Léon Brillouin, Norbert Wiener et l'incontournable Erwin Schrödinger dont l'ouvrage très important qui définit l'entropie des systèmes vivants fait écho dans l'univers de la thermodynamique. C'est ce que soutient Alain Delaunay quand il affirme :

> Ce terme a été créé, semble-t-il, par le mathématicien et physicien français Léon de Brillouin (1956, Science and Information Theory). Il l'a proposé pour remplacer les expressions d'"entropie négative" ou "entropie changée de signe", employée à peu simultanément, mais indépendamment, par Nobert Wiener et Erwin Schrödinger. Ce dernier, dans un, livre important (*What is life ?* 1945), avait mis en avant la possibilité physique de processus à "entropie négative" pour tenter de préciser les différences entre les processus thermodynamiques et les processus vitaux.[133]

Il en ressort donc que le terme "néguentropie" fut forgé pour décrire les processus du vivant ou du système vivant. Dans ce cas, comme nous avons eu à le préciser, il s'agit d'une organisation qui se situe dans une tension continuelle entre l'entropie positive qui est une loi générale le réel et l'entropie négative qui tente de faire une exception à la loi. Schrödinger affirme cette tension continuelle entre entropie et néguentropie dans le vivant, prévalence de la néguentropie, en ces termes :

> Thus a living organism continually increases its entropy - or, as you may say, produces positive entropy - and thus tends to approach the dangerous state of maximum entropy, which is death. It can only keep aloof from it, i.e. alive, by continually drawing from its environment negative entropy - which is something very positive as we shall immediately see. What an organism feeds upon is negative entropy.[134]

Cela dit, le terme *néguentropie* signifie lui-même "entropie négative". Erwin Schrödinger, celui qui a appliqué l'entropie à la biologie pour la première fois, utilisait, volontiers, l'expression d'entropie négative. Ce sont ces deux termes que Léon Brillouin avait rassemblé pour forger le

[133]Alain Delaunay, Universalis.fr/encyclopédie

[134]Erwin Schrödinger, *What is life ? The Physical Aspect of the Living Cell,* (first printing 1944), Cambridge University Press edition, 1967, *Op.Cit,* p. 71.

concept de *néguentropie* qui reste très proche de *negativ entropy*. De façon simple, la néguentropie notée (N) est l'opposé de l'entropie notée (S). Elle est un principe d'ordre au lieu d'un principe de désordre. C'est pourquoi elle opère dans les systèmes qui développent la vie. Car, comme on a l'habitude de le dire : la vie a horreur de l'entropie. Elle lui préfère la néguentropie. : Schwami Isa et Christophe Dumas définissent ainsi la néguentropie :

> Entropy's opposing force is called Negentropy. The term Negentropy is an abbreviation of "Negative Entropy". Negentropy is also called Syntropy. It was introduced in the context of a major scientific debate by several physicists including by Erwin Schrödinger. Negentropy is used to explain the presence of "order" within living beings and their tendency to oppose the chaos and disorganization that governs physical systems.[135]

Dans cette mesure où l'entropie et la néguentropie créent des effets contraires de désordre et d'ordre, nos deux auteurs Schwami Isa et Christophe Dumas estiment que la première, à savoir : l'entropie classique, est une force de répulsion. Alors que la seconde, à savoir la néguentropie, est une force de cohésion. Ils affirment à ce propos : « *Of thermodynamic origin, Negentropy is used systemically as a synonym for cohesion strength while Entropy is a synonym for repulsion force* »[136] Si donc la néguentropie s'oppose à l'entropie, on peut déduire sa formule à partir de la formule de l'entropie. Pour cela, il suffit de prendre la formule de Boltzmann où l'entropie est donnée sous la forme $\mathbf{S= log(\Omega). K_b}$. Si Ω est la mesure du désordre. Donc, sa réciproque 1/Ω peut être considérée comme la mesure de l'ordre dans le système étudié. Et puisque le logarithme de 1/Ω est égal au logarithme de -Ω, nous pouvons écrire mathématiquement :

$$N= -S \Leftrightarrow \log(1/\Omega).\ K_b$$

On peut encore, plus simplement, écrire que :

$$N= -\log(\Omega).\ K_b$$, avec N le signe de la néguentropie

Tout ce que nous avons dit au point précédent concernant précisément la néguentropie nous amène à nous poser une question, à savoir : cette dernière est un paradoxe de l'entropique ou une catégorie à part ?

[135]Schwami Isa and Christophe Dumas, *Entropy and Negentropy Principles in the I-Theory.*Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology, 2020, 6, 259-273
[136]*Idem*

Pour dire vrai, la physique nous a habitués, depuis Rudolf Clausius, à une entropie croissante ou nulle telle que : $S_{totale} = S_{créée} + S_{reçue} \geq 0$, pour les systèmes isolés. Cela a permis d'inférer le comportement de l'entropie globale de l'univers comme toujours croissante et tendant vers son maximum. Bien avant lui, Carnot avait établi le sens de la propagation de la chaleur du milieu le plus froid vers le milieu le plus chaud. Ce qui indiquait déjà le sens de la désorganisation, bien qu'avec Carnot, la chaleur n'était pas encore connue comme une excitation des particules. Boltzmann, quant à lui, va traduire l'entropie comme un ensemble de combinaisons de l'ensemble des particules constituant le système, scellant la compréhension de l'entropie comme le taux de désordre ou de désorganisation du système thermodynamique soumis à une vitesse et à une pression. Voilà pourquoi l'entropie a souvent été assimilée au désordre, à la désorganisation.

Mais avant d'arriver à Boltzmann, Max Planck avait posé les fondements sur lesquels les travaux de Boltzmann seront élaborés. Mais lui, avait fait tendre la température vers le zéro absolu, afin de montrer que l'entropie peut diminuer, simulant même une situation irréalisable de température -273,15^{o} C où l'entropie serait nulle. Les travaux de Planck seront formulés par Nersnt sous la forme de 3^{e} principe. Mais, cette décroissance n'est pas significative dans la mesure où elle est provoquée par des conditions extérieures plus basses que celles du système, et cesse quand le système atteint le seuil d'équilibre thermique. Seulement avec Erwin Schrödinger la production d'entropie négative observée dans les systèmes vivants prendra une autre signification. Pour lui, cette entropie négative plus tard appelée néguentropie deviendra le principe fondamental du vivant. Pour Erwin Schrödinger, ce n'est pas de l'Energie que se nourrit le vivant, mais de la néguentropie : « *What an organism feeds upon is negative entropy. Or, to put it less paradoxically, the essential thing in metabolism is that the organism succeeds in freeing itself from all the entropy it cannot help producing while alive.* »[137]

Cela étant, la question est pertinente, celle de savoir si c'est un paradoxe entropique ou une catégorie nouvelle. Nous commençons par dire que la néguentropie n'est pas une catégorie nouvelle, car elle était déjà présente dans les travaux de Planck et de Nernst. Quand Boltzmann en donne l'équation qui permet de la calculer, il se sert simplement de la formule de Boltzmann à

[137] Erwin Schrödinger, *What is life ? The Physical Aspect of the Living Cell*, (first printing 1944), Cambridge University Press edition, 1967, *Op.Cit.*, p 71

laquelle il affecte le signe négatif. Ce qui signifie qu'elle n'est pas une catégorie nouvelle forgée *ex nihilo*. C'est simplement une entropie qui prend le sens inverse réalisant tout le contraire de ce que l'entropie normale n'aurait pas réalisée. On ne peut donc pas la considérer comme une catégorie nouvelle car, sa formule est contenue dans la formule de l'entropie par renversement de sens. Il reste donc à savoir si c'est un paradoxe entropique entendu comme association d'idées antithétiques. A ce niveau, on dira également qu'elle n'est pas un paradoxe, car elle ne viole aucun principe thermodynamique. Elle ne redéfinit pas, par exemple, le sens spontané de l'écoulement de la chaleur. Mais, elle pose les conditions dans lesquelles, la chaleur, bien que suivant le sens normal de sa diffusion, ne serait pas assez significative pour que l'entropie soit principe de destruction. C'est le cas de deux systèmes en interaction mutuelle, l'un très petit avec une chaleur très faible et l'autre très grand avec une température très basse. La chaleur suivra son sens sans que l'entropie du système chaud désorganise celui du système froid. Et ce, à cause de la grande différence de volume et de la faible quantité de chaleur. Dans le système vivant, c'est exactement ce qui se passe dans cet exemple qui s'y déroule. De fait, le système vivant se comporte parfaitement comme un petit système de volume fini en contact avec un grand système de volume infini avec lequel il échange la matière et la chaleur. De même que l'entropie du petit système ne réussira pas à désorganiser le grand système, de même l'entropie du système vivant sera toujours négative, car elle ne réussira pas à désorganiser l'univers. Ici, on peut s'appuyer sur le modèle des grands ensembles canoniques de Gibbs. Ce sont des ensembles tels que l'un est de volume fini et de température finie, alors que l'autre est de volume infini et de température infinie. Les échanges effectués n'altèrent pas l'entropie du grand système. Mais, bien plus, ils altèrent celui du petit système qui verra toujours son entropie décroître au fil du temps grâce aux apports provenant de l'environnement.

La néguentropie n'est donc pas un paradoxe entropique ; c'est la situation de deux systèmes (un petit et un grand) qui s'échangent matière et énergie de sorte que l'entropie du petit système soit minimale par l'effet de l'entropie négative reçue du grand système (l'univers). Ceci étant une loi physique, la néguentropie n'est pas un paradoxe entropique. Cet exemple nous montre, à bien des égards, que l'entropie de l'univers décroît localement, car sa température reste constante, c'est-à-dire que cette dernière ne change pas quel que soit le système avec lequel il peut échanger. Car, on la suppose infinie.

Les systèmes vivants peuvent donc déjà nous aider à théoriser l'entropie locale comme étant décroissante. Car, sur des longues durées, chaque système échangeant avec le grand ensemble univers finit par subir la température de l'univers et finit par faire baisser l'entropie. Nous avons, en effet, dit qu'aucun système n'est isolé tous les systèmes sont ouverts à cause de la perméabilité et de la porosité de la matière. Le système isolé étant une idéalisation. Donc, tout système communique avec le système thermodynamique géant qu'est l'univers, exactement comme dans le cas des grands ensembles canoniques de Gibbs où le petit système subit les conditions du grand système.

CONCLUSION PARTIELLE

La première partie a été fondamentale, au sens strict du terme. Car, elle nous a permis de poser les fondements même de la thermodynamique. Ces fondements reposent sur les types de systèmes thermodynamiques (isolés, fermés, ouverts) et le comportement entropique dans chaque cas.

Nous avons commencé par un chapitre structurant qui annonçait des possibilités d'une décroissance de l'entropie à partir de nos expériences quotidiennes et à partir des expériences de pensées soutenues par les théories physiques. Par la suite, nous avons étudié les systèmes isolés où nous avons reprécisé le contexte de l'énonciation du deuxième principe en faveur de la croissance entropique, un principe fondamental. Cela nous a permis de ressortir la limite de ce principe. Cela étant, nous avons relevé les forces qui influencent le comportement entropique telles que les forces mécaniques engendrant des dissipations ; celle-ci ont une incidence sur le comportement général de l'entropie. Par la suite, nous avons également parlé des forces qui n'influencent pas le comportement de l'entropie telles que les forces dissipatives ou non-conservatives. Après cela, nous avons également évoqué le rôle des fluctuations et de la résistance du milieu dans les systèmes isolés comme un facteur de réduction de la production entropique. Au-delà du deuxième principe, nous avons également fait mention des autres principes thermodynamiques.

Une bonne place a été donnée après aux systèmes ouverts et fermés où l'entropie pouvait parfois croître ou décroître compte tenu des conditions auxquelles un système est soumis. A ce niveau l'éloignement à l'équilibre qui engendre la thermodynamique linéaire des processus de non-équilibre nous a offert un beau spectacle où la production d'entropie minimale engendrait des structures organisées dites structures dissipatives.

Cela nous a permis de parler des structures vivantes. Ce sont des systèmes ouverts d'un type particulier. Leur spécificité étant d'être organisées et de maintenir leur organisation. Nous avons parlé de la production de l'ordre à partir de l'ordre contrairement aux autres systèmes qui se servaient de l'entropie négative pour produire l'ordre à partir du désordre. Cette nouvelle

forme d'entropie était appelée sous le vocable de néguentropie. Cela nous permis de faire le pas de la physique vers les autres sciences telles que la chimie et la biologie. Tous ces cas et ces situations ont toujours permis de mettre en surbrillance la décroissance de l'entropie. Pour terminer cette partie, nous pouvons nous rendre compte du nombre exponentiel de situations où l'entropie décroît. Cela va même jusqu'aux systèmes isolés qui sont, en principe, une exception par rapport aux autres systèmes caractérisés par la production d'entropie minimale. Nous pouvons donc nous rendre compte que la croissance entropique est une exception alors que la décroissance entropique est la règle. Car si tous les systèmes sont des systèmes ouverts à une échelle très petite, ils finissent tous par être influencés par le grand système univers dont on suppose les variables inchangeables par rapport aux petits systèmes et dont les conditions finissent par l'emporter sur les conditions de n'importe quel petit système comme dans le cas des grands systèmes canoniques. Cela nous permet, en revanche, de formuler progressivement une théorie de la décroissance du désordre dans l'univers.

DEUXIÈME PARTIE : APORIES DE L'APPROCHE THEORIQUE D'UNE ENTROPIE UNIVERSELLE CROISSANTE

INTRODUCTION PARTIELLE

Notre présente réflexion ambitionne l'audacieux projet de la formulation d'une théorisation de la décroissance du désordre cosmique, ce qui revient concrètement à théoriser une décroissance généralisée -ou presque- de l'entropie. La première partie nous permis de voir que l'entropie n'est pas essentiellement croissante, comme cela fut prétendu par les pionniers de la thermodynamique. Elle peut prendre une autre direction selon le sens des évènements. En d'autres termes, l'entropie peut bien être un principe d'ordre ou alors un principe de désordre selon le rôle qu'elle joue dans un système thermodynamique (rôle constructif ou destructif). Dans la première partie, nous avons appris que, au niveau local, l'entropie décroît très souvent. Tous les systèmes sont approximativement des systèmes ouverts ou fermés à l'échelle quantique où ne saurait s'appliquer rigoureusement le second principe en faveur de la croissance de l'entropie. Donc, l'entropie de tous les systèmes serait susceptible de décroitre à un moment donné. On pourrait dire que : l'entropie d'un système a beau croître, il finirait toujours par décroître à la suite d'interactions avec l'environnement. A ce niveau, nous pouvons parodier Henri Poincaré qui affirmait **qu'un mouvement chaotique peut paraître stable durant des centaines de millions d'années avant de constater qu'il était chaotique et qu'il peut sortir de son îlot de stabilité**. Nous pouvons appliquer ces propos aux systèmes dits isolés en disant qu'un système peut paraître isolé durant de longues années avant de constater qu'il était ouvert à l'échelle quantique et qu'il peut sortir de son îlot d'isolement et se comporter comme un système ouvert. En revanche, un vrai système isolé n'existe pas, tout système isolé n'est qu'une idéalisation ou une fiction. Dans ce cas, le seul vrai système isolé serait l'univers lui-même qui est une singularité physique dont l'entropie est définie jusqu'ici comme croissante, selon le modèle standard ΛCDM de la cosmologie. Actuellement, il est donc question de souligner les apories théoriques de la définition d'un tel comportement entropique. Il s'agit de montrer les difficultés de formulation de la croissance entropique à l'échelle universelle.

CHAPITRE 4 : DIFFICULTÉS THÉORIQUES DE LA FORMULATION D'UNE ENTROPIE UNIVERSELLE CROISSANTE

Le modèle standard de la cosmologie soutient que l'univers est un système isolé à entropie croissante, en conformité avec le second principe de thermodynamique dans les systèmes isolés, et celui-ci court inexorablement vers la mort thermique qui correspond au maximum entropique. Son entropie est donnée exactement comme dans n'importe quel système isolé, à savoir $S \geq 0$. Ce qui signifie, en d'autres termes, que le désordre cosmique devrait être de plus en plus croissant jusqu'à l'atteinte du seuil chaotique maximal.

Effet, parti d'un point de concentration unique dont la chaleur et l'énergie étaient au voisinage de l'infini, l'énergie de l'univers se diffuse progressivement dans tout son contenu en même temps que celui-ci se refroidit et que son contenu se disperse à travers son expansion. Nous remarquons que le modèle standard de la cosmologie repose sur un modèle validé par la communauté scientifique, à savoir la théorie du big bang, de nature expansionniste, de l'école française, avec les figures proéminentes telles que George Lemaître, en opposition à la théorie stationnaire de l'école anglaise défendue Bondi, Hoyle et Fred. Bien que validée par la communauté scientifique, nous estimons que, comme dans chaque théorie, comme le dit le philosophe Imre Lakatos, un programme de recherche est constitué d'un noyau théorique dur, protégé de toute falsification par une ceinture d'hypothèses auxiliaires. En ce sens, la tâche du chercheur consiste à compléter ce noyau dur par de nouvelles hypothèses explicatives et prédictives. C'est ce que soutient Alan Chalmers :

> Un programme de recherche lakatosien est une structure qui guide la recherche future d'une façon positive et aussi d'une façon négative. L'heuristique négative d'un programme consiste en ce que les hypothèses de base sous-tendant le programme, son noyau dur, ne doivent être ni rejetées ni modifiées. Il est protégé des falsifications par une ceinture protectrice d'hypothèses auxiliaires, de conditions initiales, etc. L'heuristique positive est constituée de lignes de conduite générale qui sont des directions de développement du programme de recherche. Elles consistent à compléter le noyau dur par des hypothèses supplémentaires visant à rendre compte de phénomènes déjà connus et à en prédire de nouveaux.[138]

[138] Alan F. Chalmers *Qu'est-ce que la science ? Récents développements en philosophie des sciences : Popper, Kuhn, Lakatos, Feyerabend*, Éditions La Découverte, Paris, 1988, p 111.

Il n'est donc pas interdit de revenir poser de nouvelles hypothèses pour parfaire la théorie. C'est pourquoi nous consacrons cette partie aux difficultés théoriques que pose la formulation d'une entropie croissante de l'univers.

4.1. L'univers comme un système thermodynamique singulier ?

4.1.1. De l'équation de production de la matière par l'espace-temps : impact sur la production d'entropie

Nous pouvons définir un système thermodynamique comme toute portion de l'univers définie par des frontières ou encore comme un ensemble d'objets contenus dans une portion qui constitue un objet d'étude limité par des frontières. Arthur Shavit et Arthur Chaim Gutfinder affirment: *« for a system to be defined, one must specify its exact boundaries and the contentswithin these boundaries. »*[139]Ils mettent ici en surlignage la notion de frontières. Ils poursuivent en ajoutant que ces frontières peuvent être réelles ou imaginaires. Ils déclarent encore: *« The boundary of the system may be real or imaginary, and it may be stationary or changing with time ; it must, however, be well defined at all times. »*[140]Les frontières et le contenu sont très importants pour définir un système thermodynamique. Ainsi l'univers lui-même est-il considéré comme un système thermodynamique. Donc, il serait le grand système thermodynamique. Les autres systèmes peuvent être considérés comme des petits systèmes à côté du grand système avec qui ils sont en interactions comme dans le cas des grands ensembles canoniques. Ilya Prigogine en parle en termes de système thermodynamique géant. Il déclare, en effet, que : *« L'univers est un système thermodynamique géant. A tous les niveaux, nous rencontrons des instabilités et des bifurcations. »*[141]Aussi les cosmologistes appliquent-ils le qualificatif de système thermodynamique à l'univers, car il possède un contenu et des frontières bien qu'ils soient imaginaires. C'est cette idée de frontières qui crée l'intrigue dans cette partie. Nous y reviendrons dans la suite. Toujours est-il que l'univers est considéré par le modèle standard comme un système thermodynamique isolé. Isolé parce qu'il est une singularité physique né d'un évènement singulier, à savoir le big bang, à l'origine de tout ce qui existe. Comme tel, il n'existe pas un autre univers, au sens propre du terme, avec qui il pourrait être en

[139]Arthur Shavit and Chaim Gutfinder, *Thermodynamics. From concepts to applications*, CRC Press Taylor and Francis group, 2008, *Op.Cit*, p.6
[140]*Idem*
[141] Prigogine Ilya, *La fin des certitudes*, Odile Jacob, paris, 2001,*Op.Cit*, p.222

interaction pour lui prêter de l'énergie, du travail, de la chaleur et de la matière ou en recevoir. Dans cette perspective, il serait alors le seul vrai système isolé ; les autres systèmes isolés n'étant que des approximations. De ce point de vue, le second principe de thermodynamique s'appliquerait infailliblement sur l'univers en tant que système isolé parfait.

$S_{totale} = S_{créée} + S_{ext} \geq 0$

Mais, en reprenant les choses de façon très minutieuse, on se rend compte que certains détails sont problématiques. La première difficulté est celle du volume de l'univers. Le volume de l'univers est instable à cause de son expansion. Or, le paramètre volume est déterminant dans les calculs en thermodynamique. Il fait partie des variables d'état extensives qui sont très déterminantes pour connaître l'état d'un système thermodynamique. Frédéric Doumenc :

> Les variables d'états peuvent être classées en deux catégories : les grandeurs extensives et les grandeurs intensives. Supposons qu'un système thermodynamique soit « dupliqué », ainsi que son environnement. La réunion du système initial et de sa « copie » forme alors un nouveau système, dont la taille est multipliée par deux. Certaines variables d'état, telles que la pression, la température, la concentration, resteront inchangées par rapport au système initial : ce sont des variables intensives. D'autres variables, comme le volume, le nombre de moles, la masse, la charge électrique, verront leur valeur multipliée par deux : ce sont des variables extensives. En résumé, les variables extensives sont celles qui dépendent de l'étendue du système (autrement dit de sa taille)[142].

Frédéric Doumenc nous fait comprendre ici que les variables extensives sont en rapport avec la taille du système. Il faudrait donc que cette taille du système soit connue à l'avance pour obtenir des résultats fiables conséquemment. Or, le modèle standard de la cosmologie décrit un univers qui ne cesse de gonfler à une vitesse actuelle précisée par les calculs bien que changeante, avec des phases d'accélération et de décélération. Aujourd'hui, elle est de 67,3667Km /s/mégaparsec/.[143]Ce phénomène engendre l'éloignement des galaxies les unes des autres selon la formule du célèbre physicien Hubble qui est donnée par la relation $\mathbf{V= D. H_o}$ où *V* représente la vitesse d'éloignement des galaxies, *D* représente la distance entre les deux galaxies considérées et H_o, représente la constante de Hubble. C'est la formule de l'éloignement des galaxies dans l'univers. Si les galaxies s'éloignent les unes des autres, la théorie expansionniste ne fait pas état d'un déplacement des galaxies en elles-mêmes, mais, plutôt d'une dilatation de l'espace-temps. En effet, c'est l'espace-temps lui-même qui gonfle créant cet éloignement entre

[142]Frédéric Doumenc, *éléments de thermodynamique et thermique, Thermodynamique I* , Université Pierre et Marie Curie, Licence de Mécanique - L2, Année 2008/2009, p. 13.

[143] Un mégaparsec correspond à 3 261 150, 695815458 Année-Lumière. Une année lumière est la distance parcourue par la lumière en un an est de 299 792 458/S soit environ 300 000 000/S. in *Univers* www.astrophysic.org

deux points séparés de l'univers. C'est ce qu'on retrouve dans Wikipédia dans la section réservée à l'expansion de l'univers. On peut lire ceci :

> En cosmologie, l'expansion de l'univers est le phénomène selon lequel les galaxies distantes semblent s'éloigner les unes des autres. Cet éloignement, que l'on peut naïvement interpréter comme un mouvement des galaxies dans l'espace, s'interprète de façon plus exacte par une dilatation de l'espace lui-même, dans lequel les objets célestes sont amenés à s'éloigner les uns des autres (en tout cas dès que leurs interactions gravitationnelles ne sont pas assez importantes)[144].

Cette expansion entraîne un décalage des raies spectrales, connu sous le nom de *red shift* prévu par la théorie de la relativité générale et vérifiée par Sir Eddington. Le *red shift* correspond au virage vers le rouge des raies spectrales qui est un effet dû à la dilation de l'espace entraînant la distanciation des galaxies. En effet, l'expansion de l'univers « allonge » les longueurs d'onde des photons de l'univers. Il se crée donc un décalage entre la position de l'étoile lors de l'émission de la lumière noté $a_(t)$ et la position actuelle a_0 créant donc un virage vers le rouge par « allongement » des ondes électromagnétiques, les calculs sont possibles par la formule suivante : $\mathbf{1+}\ \boldsymbol{z} = \frac{\boldsymbol{a0}}{\boldsymbol{a(t)}}$. Puisque *z* est toujours supérieur à zéro (z>0), alors il y a décalage vers le rouge. Donc, l'univers est en pleine expansion, et cela influe sur son volume qui connaît des variations. Cette variation de volume rend difficile la maitrise de son entropie. En effet, l'accroissement de son volume en lui-même ne fait pas problème. Ce qui fait problème c'est l'instabilité de cet accroissement de volume. Julien Grain, cosmologiste travaillant dans le programme de l'expansion de l'univers, affirme : *« L'univers ne s'étire pas toujours à la même vitesse. L'expansion dépend du taux de matière qu'il y a dedans. Et ça on peut le mesurer. On peut donc refaire l'histoire à l'envers, et observer que, pendant très longtemps il y a eu des phases d'expansion décélérée. »*[145]Si le volume est lié à la vitesse d'expansion, il faut connaître cette vitesse d'expansion à toutes les phases de l'univers pour déterminer le contenu de l'univers à cet âge de son évolution, et en déduire son volume. Car, le contenu (quantité de matière) de l'univers détermine la force gravitationnelle qui y règne. Il devient très difficile de parler avec certitude de son volume. En conséquence, le premier principe de thermodynamique qui lie la variation d'énergie et la variation de la pression-volume avec la variation de la chaleur devient difficile à

[144] Rominandreau, *Discussion : Expansion de l'Univers* du 27 janvier 2009 in Wikipédia
[145] Julien Grain, *« L'expansion de l'univers : l'impossible mesure »* in https//radiofrance.fr>podcasts

appliquer. Ce principe stipule que : **dE+dPV=dQ**, où E est l'énergie interne, P la pression, V le volume et dQ la chaleur reçue.

Etant donné que, pour le cas de la transformation adiabatique dQ=0, et puisque l'univers est un système isolé, le plus isolé de tous les systèmes d'ailleurs, il n'existe donc pas de chaleur reçue par le système. Alors, l'équation du premier principe de thermodynamique décrivant la conservation de son énergie se ramène simplement à ceci dE+dPV=0.

Dans tous les cas, tout va se jouer sur la variation de la pression volume. Or, nous avons établi que le *volume de l'univers*[146] n'est pas stable. En plus, la vitesse d'expansion qui rend compte de cette expansion dépend du niveau de la force gravitationnelle régnant dans l'univers, ce qui signifie que l'expansion n'est pas uniforme et isotrope. Elle pourrait bien varier d'un moment à un autre et d'une région à une autre sous l'effet de la gravitation locale à telle enseigne que l'univers a connu des phases d'accélération et des phases de décélération dans son expansion. C'est ce phénomène que Julien Grain décrit sous la dénomination de l'impossible mesure. Julien Grain affirme qu'« *on peut donc refaire l'histoire à l'envers, et observer que, pendant très longtemps il y a eu des phases d'expansion décélérée. »*[147]

En effet, l'expansion pose deux problèmes, à savoir celui du volume de l'univers et celui du taux de matière dans l'univers. Ces variables qui sont changeantes au cours de l'histoire de l'univers alors que, dans un système isolé, elles devraient être inchangées. Car, le système isolé est, en principe, un système aux parois indéformables, d'une part, et adiabatique, d'autre part. Il ne peut donc ni recevoir de la matière et la chaleur encore moins varier de volume. C'est un système en régime stationnaire par rapport à la quantité de matière qu'il contient, ainsi que par rapport au volume occupé par cette quantité de matière. Le régime stationnaire est l'état d'un

[146] Le volume de l'univers est estimé actuellement à 3,15 fois le rayon de Hubble soit $4{,}16 \times 10^{26}$. Mais, il ne s'agit là que l'univers observable ou encore l'horizon des événements qui correspond à l'univers tel que perçu par nos instruments actuels. Il décrit des objets dont nous pouvons voir la lumière réfléchie depuis la terre. Mais, les processus qui se passent derrière cet horizon des événements sont complètement invisibles à l'œil humain. Puisque nous n'observons l'univers que sous l'angle de la position de la terre. Et puisque notre connaissance s'arrête à l'univers observables, la question de la taille globale de l'univers demeure un mystère irrésolu. Ce n'est alors encore qu'un balbutiement. Car l'expansion commencée depuis presque 13,5 milliards d'années lui impose un accroissement permanent de son crayon qui a un impact sur son volume. Son rayon et son volume devrait donc varier continuellement.
Mais à l'état actuel des choses, son volume est souvent déduit de son supposé rayon. D'où le volume de l'univers observable est de $V = 3/4\pi R^3 : 2 \times 10^{80}\ m^3$. Ces chiffres estimés par le modèle standard de la cosmologie actuel restent, bel et bien, aléatoires.

[147] Julien Grain, *« L'expansion de l'univers : l'impossible mesure »* in https//radiofrance.fr>podcasts

système dont les variables d'état sont stables au cours du temps. Donc, un système isolé est censé maintenir ses variables d'état extensives (volume, quantité de matière, par exemple), lesquelles sont en rapport avec la taille du système. En fait, la quantité de matière ne saurait changer, de même que le volume, quand il s'agit d'un système isolé qui est, par définition, un système qui n'admet aucun échange avec l'environnement. Sinon cette augmentation violerait le principe de raison suffisante qui stipule que chaque chose a une raison suffisante qui explique sa présence ; il n'existe donc pas de phénomène sans cause. Or, pour ce qui est de l'univers, nous avons vu que son volume est changeant au cours de son histoire, aussi bien que son contenu. La création de matière dans l'univers suppose que la quantité de matière de l'univers varie au cours du temps. Et cela ne fait que compliquer davantage certains calculs liés à ses paramètres thermodynamiques. Quand on prend l'univers, on se rend compte que son contenu va grandissant au fil de son histoire. Il faut donc introduire de nouveaux calculs qui tiennent compte de la création de la matière à l'intérieur du système univers. dN correspond à cette variation du nombre de particules dans l'univers. Cela suppose une création interne de la matière notée « ṅ ». Cette création de matière change les données et fait de l'univers un système ouvert dont la création d'entropie est

$$\mathbf{d_iS=s/n\ d(nR^3)\geq 0}$$

La variation de l'entropie de l'univers dS change de sens et se réduit à la production d'entropie d_iS. Cette production d'entropie est liée à la quantité de la matière qui fait varier le volume de l'univers comme l'équation nous le montre. Et le processus est irréversible, d'où l'inégalité. Ilya Prigogine affirme que *« L'inégalité exprime que la création de particules est un processus irréversible. L'espace-temps peut créer de la matière, mais pas inversement. »*[148]Cela permet d'écrire la production de matière en rapport avec la fonction de Hubble, sous la forme

$\mathbf{\dot{n} +3Hn\geq 0}$ où H est la fonction de Hubble.

Dans cette équation, la fonction de Hubble sera positive ce qui permet de voir que la création de matière a un impact significatif sur l'expansion de l'univers et conséquemment sur son volume. Maintenant, si nous laissons de côté les variables extensives (volume, taille du

[148] Prigogine Ilya, *Entre le temps et l'éternité*, Flammarion, Paris, 1992, p. 281.

système) qui adoptent un comportement inattendu dans le grand système univers, pour simplifier la réflexion et parler plutôt de l'entropie créée par particule créée, on aura :

$d_iS = sdN$ où s est l'entropie par particule.

Mais cela ne nous permet pas déduire l'entropie générale de l'univers. Car, il peut bien se trouver que l'entropie locale au voisinage d'une particule croisse alors que l'entropie totale du système décroît et vice versa. Pour appliquer le second principe de thermodynamique à l'univers, on procède en forçant les données ou en édulcorant le principe : il ne s'agit plus d'évolution de la fonction d'état entropique ($dS \geq 0$), comme dans le cas des systèmes isolés classiques. Bien plus, il s'agit de faire correspondre la variation d'entropie à la création d'entropie par particule créée. Prigogine affirme :

> La création éventuelle de la matière nous force à reformuler les deux principes de thermodynamique. Il nous faut d'une part, ajouter à l'équation $dE+dPV=0$ un terme de source d'énergie interne qui traduise cette création d'entropie et soit proportionnel à dN, la variation du nombre de particules ; d'autre part, ce terme doit être choisi de manière que le second principe corresponde désormais à une production d'entropie positive ou nulle due à la création de la matière.[149]

Il est clair que les calculs sur les valeurs thermodynamiques à l'échelle de l'univers posent de sérieux problèmes. La formulation de l'entropie de l'univers prend directement un coup. Pour terminer, nous pouvons déjà noter des difficultés qui relèvent de la spécificité du système thermodynamique universelle. Il rompt avec les données usuelles et générales des systèmes thermodynamiques. Car il est, avant tout, une singularité. Et par principe, les singularités posent d'énormes problèmes à la science qui, elle, travaille à partir d'un ensemble de phénomènes qui peuvent entrer dans une catégorie d'étude. Ainsi les systèmes classiques n'ont rien à avoir avec le système univers. Quand nous sommes dans les systèmes classiques, les principes et les lois coulissent naturellement et donnent lieu à de calculs simples. Mais, quand on se rend au niveau du système thermodynamique géant, il y a un comportement inattendu ou presque cocasse des variables thermodynamiques qui perdent leurs caractéristiques habituelles. Nous avons tantôt fait allusion aux variables extensives tels que le volume et la masse[150], mais les variables intensives,

[149]Prigogine Ilya, *Entre le temps et l'éternité,* Flammarion, Paris, 1992, *Op.Cit.,* p.213

[150] Le problème de la masse de l'univers est tout aussi complexe que celui de son volume. Il y a trois éléments qui entrent en ligne de compte pour parler de sa masse, à savoir ; -l'énergie noire à pression négative qui constitue 70% de sa masse totale ; et la masse baryonique ou matière ordinaire (constitué d'atomes), qui associée à la matière noire constituent à deux les 30% de la matière totale. Or, l'énergie noire et la matière noire restent des mystères irrésolus. Les calculs ne considèrent que la matière baryonique qui est peu représentative bien que celle-ci même se crée

telle que la pression, auront également des difficultés à être définies. En effet, la pression en thermodynamique est liée à l'interaction des particules avec les frontières du système. Mais, en fait de système, parlant du système thermodynamique géant, il s'agit d'un système isolé dont les frontières sont problématiques. D'où la complexité de l'étude et la perplexité de notre présente réflexion.

4.1.2. Des problèmes observés dans la maîtrise des variables extensives et intensives dans le modèle standard : l'univers un système isolé aux frontières ouvertes ?

Nous avons parlé plus haut de l'univers comme un système singulier voire atypique. Nous avons commencé par indexer les variables d'état extensives telles que le volume ou la taille du système et la masse considérée comme la quantité de matière qui occupe le volume de ce système. Reprécisons que les variables extensives sont celles qui augmentent si on faisait une réplique identique du même système. Par contre, d'autres valeurs sont dites intensives. Ces dernières sont des variables qui ne changent pas si on procédait à une réplique du système concerné. A. Abada, G. Abramovici, J.-L. Raimbault et G. Roux affirment :

> Parmi les variables macroscopiques introduites précédemment, certaines sont dites extensives, d'autres intensives. Pour définir une quantité extensive ou intensive, on peut faire l'expérience de pensée suivante : on double le système étudié, de façon à ce qu'il garde les mêmes propriétés physiques ; les quantités extensives sont doublées lors de l'expérience, les quantités intensives sont celles qui sont conservées. Sont intensives la température, la densité, le potentiel chimique, la vitesse de dérive, l'énergie d'agitation par particule, la pression... Les quantités extensives sont plus rares : l'énergie totale du système (souvent notée U ou E), V le volume qu'il occupe, N le nombre de particules total (N1, N2, ..., les nombres de particules de type A1, A2, ..., quand il y a différentes espèces de particules), la capacité calorifique[151]

Toutes ces variables (extensives et intensives) entrent en ligne de compte dans la détermination de l'entropie d'un système thermodynamique. Ici, nous allons davantage nous attarder sur la variable pression qui est partie intégrante de la formule de la détermination de l'énergie totale dans le premier principe de thermodynamique dans le cas où le travail est mesuré en pression-volume. Nous rappelons que cette formule est donnée dans la relation **dE+dPV=dQ**. Dans le cadre d'un système isolé, elle revenait simplement à dE+dPV=0. Le problème qui se pose ici est la détermination de la pression en tant que telle. En thermodynamique, la pression

---

continuellement rendant les calculs aléatoires. Si on ne considère que la matière baryonique selon les calculs actuels la masse de l'univers serait à 1,25x 10^{53}kg. Tous ces calculs sont donc, à l'évidence, des approximations.

[151]A. Abada, G. Abramovici, J.-L. Raimbault et G. Roux, *Cours de Physique statistique,* Parcours Physique et Applications & Mécanique, *Licence de Physique* 3`eme année, Université Paris Saclay Orsay, année académique 2015-2016, p. 14

correspond à l'effet des interactions de particules avec les bords du système ou encore avec les frontières du système. C'est ce que nous rappelle Rachida Ouargli-Saker quand il dit que *« La pression est due aux nombreux chocs des atomes ou molécules de la matière sur les parois du récipient. »*[152]La pression suppose donc l'idée de frontière et d'impact sur ces frontières pouvant connaître des déformations ou non, selon qu'on est en présence de parois déformables ou indéformables. En revenant sur le cas de l'univers, il s'agit donc de poser le problème des frontières de l'univers pour pouvoir parler de pression au sens strict du terme. Il devient, tout à fait, impossible de mesurer la pression de l'univers tel que cela est établi en thermodynamique. Par absence de frontières dans un univers en expansion continue, l'univers est parfois perçu comme un ***système isolé aux frontières ouvertes***. C'est seul système isolé qui puisse être imaginé comme tel. Isolé parce qu'il n'est en contact avec rien d'autre que lui-même. Si on définit l'univers comme l'ensemble de tout ce qui existe, on ne saurait parler de l'existence d'autres choses en dehors de tout ce qui existe.

Cela dit, on ne peut pas sereinement parler de la pression de l'univers. On pourrait seulement parler de celle exercée localement où les conditions sont réunies pour avoir un effet qui presse à partir des frontières dans système local. Par exemple, on sait que la pression atmosphérique est de l'ordre de 10912, 25 hPa. C'est la pression exercée par le mélange d'air qui constitue l'atmosphère qui est mesurée depuis le niveau de la mer jusqu'à la couche supérieure de l'atmosphère. La pression doit avoir l'effet de quelque chose qui presse comme l'indique son nom. Et pour cela, il faut des parois ou tout au moins un volume contrôlé où le volume et la quantité de matière sont fixés. C'est pourquoi la formule de la pression pour un gaz parfait est PV=nRT où n est la quantité de matière ou le nombre de particules. T est la température et V le volume.

Nous avons déjà signalé que ce nombre de particules est sans cesse grandissant en raison du fait que c'est l'espace-temps qui engendre les particules et l'inverse n'est pas possible. D'où l'inégalité qui se retrouve dans la formule de création d'entropie **$diS=s/n\ d(nR^3)\geq 0$.** Cela signifie que le nombre de particules contenues dans l'univers n'est pas fixe. Donc, l'univers est en régime non-stationnaire en ce qui concerne la matière. Ce qui rend l'équation plus complexe. Et

[152]Rachida Ouargli-Saker, *Cours de thermodynamique*, université des sciences et de la technologie d'Oran « Mohamed Boudiaf », Faculté de chimie, Département de génie des matériaux, 2015-2016,*Op.Cit,* p. 3

même si ce nombre était fixe, il serait exponentiel ; ce qui rendrait encore les calculs plus difficiles, car leur dénombrement serait encore plus long que l'âge de l'univers.

Pour ce qui est de la température, elle est connue à travers le fond diffus cosmologique découvert en 1965 par Arnold Penzias et Robert Wilson en 1965, confirmant par le fait même la théorie du big bang. C'est le rayonnement fossile qui eut lieu 380 000 ans après le big bang et qui se refroidit au fur et à mesure. A l'état actuel, il est capté dans toutes les directions de l'univers à la température 2,7^{o} K, qui correspond à -270^{o} C, faisant de l'univers un milieu très froid. De toute façon, la variable température est donc exploitable, ce qui n'est pas le cas avec les autres variables, même comme on a découvert récemment une zone plus froide dite *cold point* (l'endroit le plus froid de l'univers) dont la température se trouve en deçà du fond diffus cosmologique.

En ce qui concerne le volume, nous avons dit que celui-ci n'est pas stable en raison de l'expansion continue de l'univers. Ce qui rend difficile l'idée de frontières. Si l'univers n'a pas de frontières fictives ou réelles, sur quoi peut-on se baser pour fixer sa pression ? Parfois les astronomes se permettent de fixer la pression régnant dans certaines régions de l'univers par rapport à la présence d'atomes dans le vide intergalactique. Cela paraît bien inconvenable par rapport à la définition de la densité et de la pression. En effet, la pression n'est pas réalisée par la seule présence ou non d'atomes ou encore simplement leur agitation moléculaire[153]. Elle est due à l'effet des particules sur les bords du système qui agissent au niveau macroscopique comme une force pressante. Un ballon gonflé aura une pression précise non pas à cause du nombre de molécules de ce ballon, mais par rapport à leurs interactions avec les parois qui sont maintenues tendues du fait de la force pressante. C'est en vertu d'une mauvaise manipulation du terme pression qu'on se retrouve avec des pressions différentes dans les régions de l'univers selon le lieu où on est. On confond alors pression et densité. La densité c'est la quantité de matière dans un volume. Dans le système international, elle est estimée en kilogramme par mètre cube. Alors que la pression, en thermodynamique, est l'effet des particules sur les parois du système créant un effet de tension. Alors, on estime souvent la pression de l'univers en termes de densité ce qui, à l'analyse, fait problème. C'est ce qu'on peut lire dans la colonne de cet article : *« Une pression de 10^{-8} Pa est appelée ultravide, ce qui, aux températures usuelles (300K), correspond à une densité de l'ordre d'une dizaine de millions de molécules par centimètre cube. Par comparaison,*

[153] L'agitation des particules qui crée des collisions entre les particules entre elles renvoie plutôt à la notion de chaleur.

la densité au sein des gaz interstellaires est de l'ordre de 1 atome par centimètre. »[154]Or, nous savons que le nombre de particules ne détermine pas une pression fixe. Il est établi en thermodynamique qu'un système peut contenir des particules peu nombreuses, mais si celles-ci baignent dans une température élevée, le système aura, en retour, une pression élevée. Par contre, un autre système peut contenir des particules plus nombreuses et baigner dans une température froide qui leur impose moins d'agitation. Le système se caractérise par une pression plus faible. Car, au fur et à mesure qu'on tend vers le zéro absolu, la pression baisse. C'est la deuxième loi des gaz parfois, dite loi de Gay-Lussac énoncée comme suit : *A pression constante, le volume d'un gaz est inversement proportionnel à sa température*. Elle est notée : $P=^{nRT}/_{V}$. Ce n'est donc pas le nombre de particules dans un volume qui détermine sa pression.

A l'inverse, la première loi des gaz parfaits dite loi de Boyle-Mariotte. Pv=nRT énonce : *A température constante, la pression d'un gaz est proportionnelle à son volume*. On pourrait avoir un système à température moins élevée, avec une quantité de particules définie dans un grand volume, la pression sera moins importante que dans un autre système à la même température, avec le même nombre de particules dans un petit volume. La réduction du volume augmentant en même temps la pression dans l'enceinte.

Si on revient aux fondamentaux, la pression de l'univers dans la globalité, est un non-sens ; puisque l'univers est un système thermodynamique isolé mais sans frontières. Un système sans frontière, en thermodynamique ne saurait avoir une pression. On pourrait calculer la chaleur qu'il dégage par rapport aux nombres de collisions de ses particules. Mais, on ne saurait déterminer sa pression, car les effets aux bords du système sont inexistants.

[154]NASA, *« What is the interstellar Medium.* » in *The interstellar Medium*, an online tutorial, Université of Hampshire Experimental Space Plasma Group (consulté le 15 mai 2017)

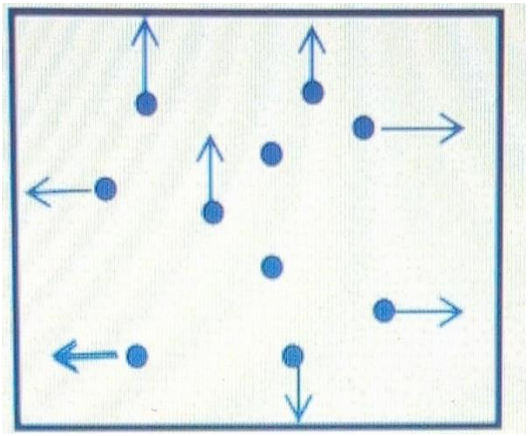


Figure 9 : Description du comportement des particules sur les parois d'une enceinte illustrant un travail de pression sur les bords extérieurs de l'enceinte.

Le dessin ci-dessus montre que la pression d'un système thermodynamique nécessite les parois ou les frontières. Ce qui fait que la question de sa pression devient une énigme difficile à résoudre. Quand on parle d'un atome par centimètre cube dans le vide interstellaire, on décrit là la densité critique ou la masse volumique et non la pression. La pression est la force exercée par unité de surface et non pas une quantité de matière par volume. Les astronomes qui calculent la pression de l'univers par rapport au nombre de particules par mètre cube dans l'espace interstellaire refusent simplement de se rendre à l'évidence de la complexité du problème. En revanche, ils ont tendance à tricher en créant une confusion terminologique entre densité, densité critique et pression de l'univers. L'univers pose donc en revanche un problème de variables thermodynamiques qui font en sorte que tous les calculs qu'on essaie de lui appliquer en tant que système thermodynamique sont problématiques. Du coup, sa singularité fait qu'on ne puisse même pas déterminer la catégorie exacte de système à laquelle il appartient en réalité. On pourrait bien le considérer comme un système isolé du fait qu'il ne communique pas avec un autre univers capable de lui transmettre de l'énergie et de la chaleur. C'est fort de cela que toutes les estimations du modèle standard considèrent l'univers comme un système isolé géant, le plus parfait des systèmes isolés. Mais, par ailleurs, on pourrait aussi le considérer comme un système ouvert atypique du fait qu'il n'a pas de frontières et qu'il ne peut satisfaire aux conditions d'un système isolé classique.

Pour terminer, nous pourrions dire que la thermodynamique a ses principes et ses fondements. Si d'aventure, ces paramètres échappent à l'observateur humain ou encore à l'expérimentateur, à savoir les variables extensives et intensives et d'autres facteurs qui entrent

en ligne de compte dans les calculs des systèmes thermodynamiques, on risque de ne pas pouvoir définir leurs corollaires comme l'entropie ou alors comme l'enthalpie etc. C'est le cas de l'univers dont ces paramètres sont problématiques. Il devient alors très probable de se trouver sur une ligne de crête entre théorie cosmologique scientifique et théorie anthropique philosophique.

4.1.3. Problème des phases et transitions de phases : regard sur les plasmas et leur entropie

Faisant suite aux autres difficultés ci-dessus évoquées concernant l'instabilité des variables extensives et les difficultés liées aux variables intensives dans la formulation d'une entropie exacte du grand système thermodynamique universel, nous nous heurtons à une autre difficulté qui nous paraît importante, à l'avenant. C'est la diversité des phases de notre système thermodynamique. Pour mieux étayer ce problème, il est important de repréciser la notion de phase en thermodynamique.

En thermodynamique, une phase est un état de la matière possible d'un système donné. Pour un système parfaitement homogène du point de vue physique et chimique, on dit que ce système est constitué d'une seule phase. Par contre, un système constitué de deux substances hétérogènes comme l'huile et l'eau dont les formules brutes sont différentes : H2O pour l'eau et $C_{18}H_{34}O_2$ pour l'huile. Nous sommes en présence de deux phases différentes du point de vue de la chimie à cause de la différence de composition de ces deux substances, ce qui engendre une hétérogénéité. L'huile aura tendance à rester au-dessus tandis que l'eau aura tendance à rester en dessous, en absence de toute agitation. Ce scénario est la situation macroscopique la plus possible de se réaliser. Presque tout le monde a déjà réalisé cette expérience. C'est un exemple typique d'un système biphasique. Nous pouvons prendre également l'exemple d'un morceau de glace plongé dans l'eau. Ce morceau de glace et le liquide constituent deux phases différentes d'un même constituant. La figure ci-dessus illustre un système thermodynamique biphasique.

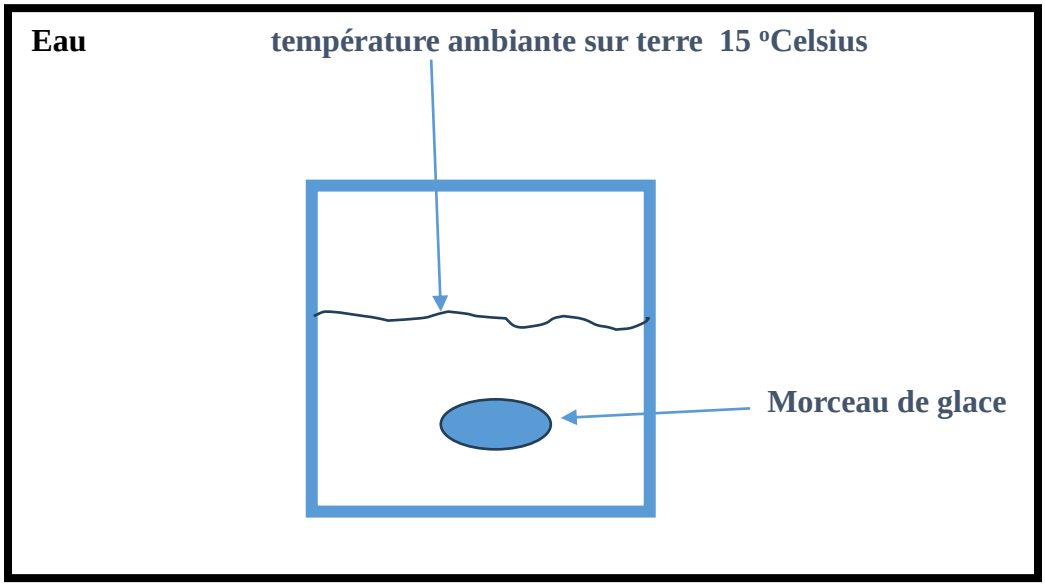


Figure 10 : Illustration d'un système ouvert avec deux phases différentes constituées de l'eau à température ambiante et un morceau de glace.

Une même substance physique peut se trouver au même moment sous deux phases différentes correspondant à deux états de la matière comme c'est le cas dans la figure ci-dessus. Cela dit, Landau et Lifschitz définissent les phases d'une substance comme *« ses états qui peuvent coexister à l'équilibre, tout en étant en contact direct. »*[155]

Alors que pour Kuobo, *« la phase est une substance physiquement et chimiquement homogène. »*[156] En général, la physique reconnaît trois états de la matière à savoir : l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux. Si nous revenons à la figure ci-dessus, supposons que l'on laisse le morceau de glace dans une eau à température ambiante pendant des heures, la situation qui va se produire au bout d'un certain temps est que le morceau de glace va fondre et se transformer en eau liquide. A la fin de l'expérience, le morceau de glace aura complètement disparu. On parle de la transition de phase lorsque l'on passe d'une phase à une autre. Chaque transition de phase implique en même temps une variation d'entropie. On peut également calculer l'enthalpie de ce morceau de glace, ce qui correspond à la quantité de chaleur (Q*p*) à pression constante absorbée par le morceau de glace pour être à température constante. C'est donc une *transformation*

[155] Lev Davidovic Landau, Evgeni Mihailovic Lifsic et Sergeî Medvedev (traduction de S. Medvedev), *Physique statistique*, Moscou/Paris, Mir Ellipses, coll. « Physique théorique », 1994, 4ed, p.27
[156] R. Kubo, *Thermodynamics*, North-Holland Publishing Company, 1968, p. 190.

endothermique puisqu'elle va de l'extérieur vers l'intérieur. On peut, en même temps, calculer la variation d'entropie au cours du processus de refroidissement à partir de la formule $\Delta S=\frac{Q}{T}$. Soit T_1 la température de l'environnement du morceau de glace et Q_1 la chaleur de l'environnement, tandis que T_2 est sa température propre et Q_2 sa chaleur propre. Puisque le morceau de glace absorbe la chaleur venant de son environnement, on aura $\Delta S = \frac{Q}{T1} + \frac{Q}{T2}$. De toute évidence, l'entropie du morceau de glace va augmenter au cours du temps jusqu'à ce que la glace passe d'un état vers un autre. Ce qui est intéressant est le fait que l'entropie n'est pas la même d'une phase à une autre. Nous pouvons remarquer que l'entropie des solides est moins importante que celle des liquides et celle des liquides est moins importante que celle des gaz. Cela signifie que, si on chauffe un solide, il devient liquide lorsqu'il atteint le seuil maximal des solides. En même temps, son entropie augmente. Si on continue de chauffer le liquide résultant de ce processus, il devient gazeux lorsqu'il atteint le seuil maximal des liquides. Et son entropie augmente une fois de plus.

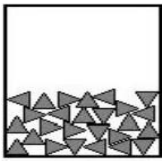


Figure (1)[157]

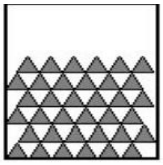


Figure (2)[158]

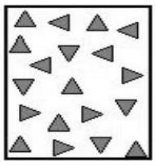


Figure (3)[159]

Figure 11 : Illustration de la disposition des molécules selon les états de la matière

La figure ci-dessus montre les différentes dispositions des molécules dans différentes phases. Dans les phases solides, les molécules ont tendance à être regroupées et compactes. Cette disposition leur donne une structure organisée. C'est pourquoi leur entropie est très basse. Dans la phase liquide, l'entropie a tendance à croître par rapport à la phase solide. Ici, la structure est moins compacte et les molécules peuvent coulisser les unes sur les autres. Les forces de frottement engendrées empêchent la transformation totale de potentielle en énergie cinétique. Il y aura donc des forces dissipatives dans ces milieux par rapport aux milieux gazeux. Par conséquent, leur entropie sera moins élevée que l'entropie des gaz, mais plus élevée que

[157] Figure : Schématisation des molécules à l'état liquide représentées par des triangles
[158] Figure : Schématisation des molécules à l'état solide représentées par des triangles
[159] Figure : Schématisation des molécules à l'état gazeux représentées par des triangles

l'entropie des solides. Dans la phase gazeuse, les particules sont libres, dispersées et en interaction persistante[160]. Dans ce cas, l'entropie aura tendance à être plus élevée que lors des phases liquides et solides.

Appliqué à l'univers dans son ensemble, il apparaît que l'univers est un milieu constitué de plusieurs phases différentes. On y retrouve à la fois des phases solides, des phases gazeuses et quelques phases liquides. Tout cela ne permet pas de calculer facilement son entropie. Car, ce dernier est un système qui regroupe toutes les phases de la matière et chaque phase a une entropie différente comme nous l'avons vu plus haut. De plus, dans l'univers, il existe une quatrième phase moins connue sur la terre. Il s'agit du plasma. Qu'est-ce que le plasma ? Un article de cosmologie publié par la FEDERATION DE RECHERCHE PLAS@PAR définit le plasma comme il suit *: « un plasma est un gaz dont les atomes, sous l'effet de la température, ont été dissociés. Alors que dans tous les trois autres états de la matière (solide, liquide et gazeux), le noyau et les électrons des atomes sont étroitement liés, ils cessent de l'être dans un plasma. Changeant de nature, le gaz « ionisé » (autre appellation du plasma) change radicalement de propriétés. »*[161]Le plasma est donc un état de la matière rare sur la terre. Mais, pourtant le plus répandu dans l'univers. Il occupe les 99% de la matière connue de l'Univers. Le même article continue en affirmant que *: « Le moins connu des quatre états de la matière est aussi, paradoxalement, le plus répandu : 99,99% de l'univers visible - les étoiles, le milieu intergalactique… - se trouve à l'état de plasma. »*[162]Hypothétiquement, le plasma est très représentatif de la matière ordinaire dite aussi matière baryonique, en faisant fi de la matière noire dont les propriétés sont encore inconnues. Au vu de cela, nous pourrions dire que le plasma est présent dans tout l'univers sous la forme de la matière connue. Dans un autre article de cosmologie, on peut lire : *« Le plasma peut être la forme ordinaire la plus abondante de la matière ordinaire dans l'univers, bien que cette hypothèse soit actuellement provisoire, fondée sur l'existence et les propriétés inconnues de la matière noire. Le plasma est principalement associé aux étoiles, s'étendant au milieu intracluster raréfié et éventuellement aux régions*

[160] Ce sont des interactions qui ne s'arrêtent contrairement aux interactions transitoires.
[161] *Plasma : la matière dans un drôle d'état* publié le 12/06/2020 et mis à jour le 06/09/2022 in *https://www.iter.org/fr/mag/13/51#*
[162] *Plasma : la matière dans un drôle d'état* op.cit.

intergalactiques. »[163]Si le plasma s'obtient en chauffant le gaz à des températures très élevées pouvant atteindre 11 000 K afin de provoquer un arrachement des électrons des atomes, pour former une soupe électrons-ions, l'entropie du plasma serait nécessairement très élevée à cause de la température de chauffage. On devrait alors conclure que le milieu interstellaire est un milieu chaud et brulant. Mais, ce n'est malheureusement pas le cas. Nous avons dit que le milieu interstellaire ou intergalactique est un milieu très froid, 2.7 K ou -270º Celsius. Cela témoigne de l'existence des plasmas froids. Ainsi, Martin Koppe affirme que : *« un gaz devient plasma lorsqu'on lui apporte une quantité d'énergie suffisante pour arracher les électrons de ses atomes et l'ioniser : il forme alors une « soupe » électron-ion capable de conduire l'électricité. Les étoiles sont, par exemple, essentiellement constituées de plasma. Ces plasmas cosmiques, qui représentent 98% de la matière observable de l'univers atteignent plusieurs millions de degrés. Alors comment passer du soleil à une inoffensive et amusante boule de plasma. »*[164]Si les plasmas chauds se retrouvent dans les étoiles, cela signifie que les milieux interstellaires et intergalactiques contiendraient des plasmas froids. Ces plasmas froids résultent une ionisation partielle des gaz. Notre ionosphère est l'exemple typique d'un plasma froid. Les milieux interstellaires froids et intergalactiques froids seraient également constitués de plasmas froids.

Aujourd'hui, la recherche sur les plasmas tente de percer le mystère des plasmas ultra-froids qui sont des plasmas en régime fortement corrélé comme l'atteste Daniel Comparat qui montre que Jupiter contiendrait des plasmas fortement corrélés en son centre, tout comme des étoiles à neutrons et des naines blanches.[165] Les plasmas ultra froids fortement corrélés témoigneraient donc d'une entropie négative comme en témoignent les corrélations de particules. Ces corrélations pourraient, en revanche, engendrer un auto-assemblage attestant de la décroissance entropique. Claire Douat, Thierry Dufour, João Santos Sousa affirment que :

> Dans un plasma froid, ce sont les électrons libres qui stockent le plus d'énergie, de sorte que leur température peut atteindre quelques dizaines de milliers de degrés Celsius. Comme leur nombre est très faible et leur masse très inférieure à celle des atomes et des molécules (les neutres, qui représentent la quasi-totalité de la matière dans les plasmas froids), les électrons

[163]*Le plasma, état de la matière très abondant dans* l'univers in *https : //www.curieusehistoires.net/le-plasma-un-etat-de-la-matiere-tres-abondant-dans-lunivers/*

[164]Martin Koppe, *Les plasmas froids réchauffe l'innovation* publié le 04/03/2016 in*https://lejournal.cnrs.fr/articles/les-plasmas-froids-rechauffent-linnovation*

[165] Daniel Comparat, Amodsen Chotia, Mathieu Viteau, Thibaut Vogt et Pierre Pillet, *Aux frontières des plasmas : les plasmas ultra-froids,* Laboratoire Aimé Cotton, CNRS, Université Paris-Sud.

> transfèrent avec peu d'efficacité leur énergie aux neutres et, par conséquent, ne chauffent pas le gaz.[166]

L'entropie pourrait donc décroître par endroit dans l'univers notamment dans les plasmas froids et ultra-froids du vide intergalactique et dans certains amas stellaires. Elle pourrait, à l'inverse, augmenter dans les plasmas chauds. Tout ceci vient à nouveau compliquer les calculs sur la formulation de l'entropie exacte appliquée à l'univers.

4.2. Mystères et énigmes

4.2.1. L'énergie noire et matière noire : la physique au défi ?

Lorsque nous parlons de mystères et énigmes, cela est à prendre au sens scientifique du terme. En effet, la science s'en nourrit comme quelque chose sans quoi elle perd son sens. L'inconnu est toujours fascinant pour la science. De ce point de vue, la science est, d'une part une quête de l'inconnu et, d'autre part, une *« re-quête »* du connu dans ce sens que, même le connu est encore objet d'une nouvelle quête, car on n'en sait jamais assez. Le mystère devient donc un lieu commun en science. La négativité apparait donc en ce sens comme une qualité et non un défaut. Le fait de ne pas percer certains mystères pour le moment est de la nature même de la science. Et c'est ce qui pousse la recherche en avant. Que d'énigmes et des mystères naguère irrésolus ont finalement été mis à nu. En termes de cosmologie, les mystères ne manquent pas ; ils abondent au contraire. C'est le lieu même de tous les grands mystères. La matière noire et l'énergie noire sont partie prenante de ces énigmes qui écument la connaissance de l'univers. Leur méconnaissance jouera certainement d'énormes tours dans la formulation exacte de l'entropie.

L'énergie noire, la matière noire et la matière baryonique sont les trois entités qui constituent la masse de l'univers observable à des proportions différentes. L'énergie noire représenterait 70% de la masse totale de l'univers. La matière noire et la matière observable ou baryonique (la matière composée d'atomes) constituerait seulement 30% de la masse totale de l'univers. Et la matière observable constituerait les 20 % de la proportion qu'elle partage avec la matière noire. Finalement la matière baryonique, celle qui est prise en compte dans les calculs ne représente que 5% de la matière totale de l'univers.

[166]Claire Douat, Thierry Dufour, João Santos Sousa, *Les plasmas froids et le Vivant, de nouvelles Avancées*, Reflets de la Physique, 2023, 75, pp.24-30.

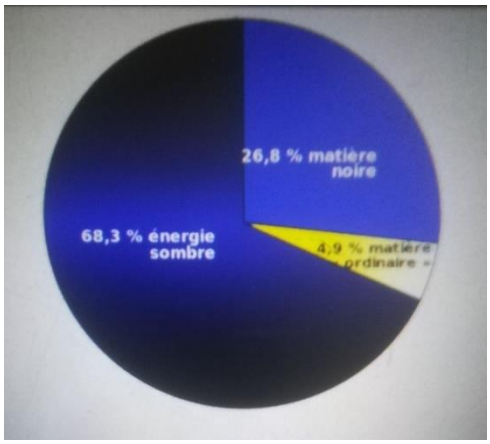


Figure 12 : Répartition de la densité d'énergie de l'univers après exploitation des premières données du satellite Planck. L'énergie noire et la matière noire en sont des composantes principales.

Les données actuelles montrent donc que la matière baryonique, à savoir la matière observable faite d'atomes, celle que nous connaissons, est très peu significative. Or, c'est cette dernière qui est prise en compte dans les estimations diverses qui sont faites en cosmologie ou en thermodynamique. Mais seulement, cette masse échappe à l'observateur qui, au final, abandonne les 95% de la masse totale pour confiner ses calculs et ses estimations sur la masse insignifiante. Il est donc très certain que beaucoup de calculs physiques à propos de l'entropie puissent être erronés, car ils se basent sur des approximations alors que des facteurs capitaux ne sont pas pris en compte. Si nous ne savons pourtant pas grand-chose de l'énergie noire, nous savons au moins que ses effets sont très importants dans l'expansion de l'univers. Sa proportion est connue : elle l'emporte de loin sur les autres matières (matière noire et observable). Nous savons aussi qu'elle est opposée à l'énergie gravitationnelle du fait qu'elle est force répulsive alors que la gravité constitue une force attractive. Si pour la force gravitationnelle, nous avons **F= :** $\frac{mA \; x \; mB}{d2}$**x G**. Par contre, nous avons, pour la force répulsive liée à l'énergie noire : V = $\mathbf{H_0}$ **x D.**

Compte tenu de ses effets observables, l'énergie noire est plus forte que la gravité, c'est pourquoi l'univers possède une expansion de plus en plus accélérée. Ignorer une telle force déterminante, à tout le moins, qui correspond de très près avec les observations, reviendrait d'office à surfer sur des vagues d'erreurs. De façon purement théorique, on sait que la variation d'énergie d'un système thermodynamique est : **dE= dW + dQ**. Nous savons aussi réécrire cette formule dans une relation pression-volume : dE= -dpv + dQ. Nous savons aussi que l'univers est

supposément un système isolé, c'est-à dire qu'il ne peut recevoir de chaleur venant de l'environnement. Donc, quand on parle de l'univers, nous avons à faire à une transformation adiabatique qui donne lieu à une variation d'entropie nulle dQ=0. Or, si nous ne maîtrisons pas l'énergie totale (E_{totale}) qui représente la densité d'énergie à cause du fait que, l'énergie noire, qui est la plus grande des énergies de l'univers, est encore une énigme, il devient, par conséquent, clair que même la quantité de chaleur puisse être erronée puisqu'on n'a pas considéré toutes les énergies qui interfèrent, mais seulement une infime quantité d'énergie liée à la matière observable. Du coup, les estimations sur l'entropie risquent, à l'avenant, d'être susceptibles d'erreurs. Car, les formules d'énergie et d'entropie sont liées. En effet, l'énergie permet de déterminer le travail et la chaleur **(dE= dW + dQ)** ; et la chaleur permet, en revanche, de déterminer l'entropie qui est donnée dans la relation **S=$\frac{Q}{T}$.** Cela dit, la méconnaissance de l'énergie pose, une fois de plus, d'énormes incertitudes sur la détermination exacte d'une entropie de l'univers.

La même impasse que celle rapportée pour l'énergie noire surgit en ce qui concerne la matière noire. Cette dernière, malgré le fait qu'elle est moins représentative que l'énergie noire, est de loin supérieure à la matière observable. La matière noire, bien qu'elle ne soit pas observable, est tout de même perceptible par ses effets.

S'il est donc établi qu'une telle matière puisse exister et qu'on n'en sait rien, cela va fausser une fois encore nos calculs. Toutes choses qui confirment l'idée de départ, à savoir que le réel est un mystère, objet de quête et de *re-quête* pour la science. L'énergie noire et la matière noire demeurent, à ce titre, des mystères et surtout des défis pour la science. Car, ce qui est mystère et énigme pour la science aujourd'hui est appelé à devenir réel conquis par la science de demain. Donc, pour le moment, puisque l'on ne peut rien dire de la matière noire et de son parèdre qui est l'énergie noire, ces dernières jouent des trouble-fêtes dans les estimations et les calculs physico-mathématiques. En les écartant alors qu'elles sont capitales, on risque de passer à côté de la vérité.

Tout compte fait, les présentes analyses témoignent de la précarité de nos calculs parce que la grande partie de la masse est, pour ainsi dire, délaissée, faute de pouvoir la manipuler. La matière baryonique qui est observée ne peut pas rendre compte de la totalité de la réalité. Ce qui nous autorise à mettre en doute bon nombres de calculs et de questionner les résultats. Une

entropie exacte ne saurait donc s'obtenir sans connaitre tous les paramètres qui entrent en ligne de compte des calculs thermodynamiques ; elle ne saurait s'obtenir encore moins avec des paramètres biaisés. Une telle situation ne permet pas de parler avec une fierté laplacienne du système thermodynamique géant. Simon pierre de Laplace est un physicien classique qui avait théorisé la connaissance parfaite de l'univers par la physique à travers les calculs déterministes tels que, lorsqu'un état de l'univers est donné, la loi physico-mathématique permettrait de connaitre tous les autres états passés, présents et futurs. D'où la métaphore du génie de Laplace. L'univers tout entier ne serait qu'un domaine conquis par l'intelligence du génie de la physique. Il caressait ainsi l'illusion voire l'idéal d'une connaissance absolue de l'univers. Simon-Pierre de La place affirmait ceci :

> Une intelligence qui, à un moment donné connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus petit atome ; rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux. L'esprit humain offre, dans la perfection qu'il a su donner à l'astronomie, une faible esquisse de cette intelligence. Ses découvertes en mécanique et en géométrie, jointes à celle de la pesanteur universelle, l'ont mis à porter de comprendre dans les mêmes expressions analytiques les états passés et futurs du système du monde. En appliquant la même méthode à quelques autres objets de ses connaissances, il est parvenu à ramener à des lois générales, les phénomènes observés, à prévoir ceux que des circonstances données doivent faire éclore.[167]

Le *démon de Laplace* est une métaphore de l'illusion d'une intelligence infinie ou divine qui a bercé la dynamique classique. Mais, la mécanique quantique posa plus tard les bases d'une incertitude en science, d'abord avec Heisenberg qui introduisit la notion d'opérateurs en physique pour décrire les phénomènes quantiques non plus en termes de trajectoires individuelles mais en termes paquet d'ondes. Il formula ainsi avec pertinence le problème d'incertitude en physique qui est relatif à la non-commutativité des observables physiques (vitesse, position) en physique quantique. Dans le même sens, Niels Bohr, à la suite Heisenberg, posait, quant à lui, le problème de la complémentarité des états quantiques (onde/corpuscule) qui n'étaient plus accessibles à l'observation, mais plutôt objet d'interprétation. C'est Ilya Prigogine, à travers la thermodynamique des processus irréversibles qui enfonce le clou de l'indéterminisme en montrant que la science classique fut celle des situations connaissables, mais la science moderne est celle où, connaissant les lois des phénomènes, on ne peut pas se gonfler de certitudes pour prédire le résultat. Ainsi, connaissant les lois qui gouvernent la thermodynamique, la

[167] Pierre-Simon Laplace, Essai *philosophique sur les probabilités*, 6e édition, Bachelier, Paris, 1840, *Op.Cit.*, p.4.

connaissance de l'univers échappe toujours au physicien qui n'en reste qu'aux approximations et parfois aux tâtonnements.

Aujourd'hui, plus la science évolue, plus elle prend conscience de l'immensité du réel à conquérir ; un réel qui ne se laisse pas facilement dompter. C'est, comme disait Bernard d'Espagnat, un réel voilé[168]. Il milite pour l'existence d'une réalité indépendante de nos observations et de nos instruments de mesure. Une réalité qui apparaît voilée à nos yeux. Le mystère de l'énergie noire et de la matière noire en est la preuve palpable. C'est dans ce même sens que Minkowski critiquait la théorie de la relativité restreinte d'Einstein de n'être peut-être qu'un effet de parallaxe, car il existe une différence entre la réalité et la réalité mesurée. Le fait que la matière noire et l'énergie noire ne sont pas mesurées ne signifie pas qu'elles n'existent pas alors que leurs effets sont palpables. Cela dit, la science n'est pas au bout de son aventure. Car, la nature est riche de caprices et de fantaisies. Ce qui rend parfois nos calculs incertains. Aussi l'énigme irrésolue de l'énergie noire et la matière noire rend-t-elle nos prétentions entropiques plus humbles.

4.2.2. Des apories entropiques d'un système thermodynamique atypique entre système isolé et système ouvert : la porte étroite.

Dans un système thermodynamique atypique, c'est-à-dire qui échappe aux catégories connues et répertoriées dans la communauté des chercheurs, les calculs poseront nécessairement des problèmes.

En effet, l'univers, comme nous l'avons dit, est système atypique voire *sui generis*. Ce qui signifie qu'il est unique en son genre. D'après des modèles différents, d'aucuns lui appliquent les propriétés qu'un système isolé tandis qu'autres lui appliquent les propriétés thermodynamiques d'un système ouvert. Dans l'un ou l'autre cas, les paramètres ne seront pas les mêmes.

Dans un système isolé, le second principe de thermodynamique s'applique sans difficultés ni heurts. Car, le second principe qui énonce un état entropique toujours croissant jusqu'au seuil critique d'entropie maximale ($S \geq 0$), avait été formulé pour s'appliquer dans les systèmes isolés. Sadi Carnot l'avait généralisé à tous les moteurs de l'univers quelle que soit leur manière de

[168]Bernard d'Espagnat, dans son célèbre ouvrage *Le réel voilé. Analyse des concepts quantiques*, montre que le réel ne se donne pas

fonctionner et quelle que soit la substance y introduite. Il affirmait : « *To see in its full generality the principle of production of work by heat, we must think of it independently of any particular agent ; we must establish arguments applicable not only to steam engines but to any imaginable heat engine whatever the working substance and whatever its manner of working*. »[169]C'est précisément Ludwig Boltzmann et Bertrand Russel qui étendirent la notion pour l'appliquer à l'univers avec un arrière-fond de pessimisme désespéré. Laurent Sacco affirme :

> Au XIXe siècle, une découverte a glacé d'effroi plusieurs physiciens et philosophes : sans un système isolé, la croissance de l'entropie est inéluctable. L'entropie est une mesure du degré de désordre d'un système et la disponibilité de l'énergie qu'il contient pour effectuer du travail, par exemple maintenir un organisme. Son inexorable augmentation implique donc que l'univers entier devait un jour finir dans la décrépitude. C'est le fameux spectre de la mort thermique. Cette conclusion conduisait celui qui est probablement le grand philosophe occidental du XXe siècle, Bertrand Rusell, à un pessimisme radical quant au destin du cosmos.[170]

Quant à Boltzmann, après avoir vu les enjeux d'une telle application sur l'univers, il fit une crise d'angoisse et se suicida : *« But Boltzmann had already lived more days than he could bear. And though he had planned to return to Vienna the following day, he decided that he would rather kill himself instead. Boltzmann set about the task of committing suicide. He was a kind man with a generous mind. This is his story and the story of his second law. »*[171]

Tout compte fait, l'idée que l'univers peut être traité comme un système isolé à entropie croissante est bien vieille et remonte aux pères de la thermodynamique. Ce serait d'ailleurs une très bonne chose de le considérer comme tel. Il serait alors le plus parfait de tous les systèmes isolés. Car, la physique, jusqu'ici, n'a fait que poser le système isolé comme une fiction ou une idéalisation. Elle affirme que le système isolé, au sens propre, n'existe pas. Il est une approximation. On approche toujours du système isolé sans jamais réellement réussir à isoler un système de son environnement. C'est le cas des récipients isothermes comme le thermos qui finissent par perdre la chaleur par contact infinitésimal avec l'environnement. On peut en dire de même des systèmes dits isolés qui sont censés conserver leur pression à l'écart de leur environnement. Mais à la fin de chaque expérience, on constate toujours que le système n'était pas réellement isolé, parce que la pression du système aura retrouvé la pression ambiante au bout

---

[169] J.S. Dudgale, Entropy and its physical meaning, Taylor and Francis publishers, University of Leeds, 1789, *Op.Cit.,* p. 28-29

[170]Laurent Sacco, *L'entropie de l'univers-son désordre-revue à la hausse* consultée dans *www.futura.sciences.com/sciences/ actualité / astronomie*

[171]Eric Johnson, *Anxiety and the Equation.Understanding Boltzmann's entropy*. The MIT Press, Massachusetts, 2018, *Op.Cit,* p.2.

d'un certain temps. L'univers lui-même, en tant que système isolé, est censé être le plus parfait dans le modèle standard de la physique qui considère que l'on est parti du big bang et que l'univers est en expansion continue. Cette catégorisation tient du fait que notre univers est le seul qui existe. Il n 'y a donc pas un autre univers en dehors de ce dernier lui servant d'environnement extérieur et capable d'effectuer avec lui des échanges d'énergies, de chaleur et de matière.

En effet, le système isolé contrairement aux systèmes fermés et ouverts ne peut effectuer ni échange de chaleur ou de matière. Comme tel, il est un système aux frontières adiabatiques. L'univers satisfait partiellement à toutes ces conditions. Mais, d'un autre côté, il ne satisfait pas, car ses frontières ne sont pas définies, ce qui implique que son volume et sa pression ne sont pas contrôlés. Ils ne cessent d'augmenter à cause de l'expansion et en plus de cela. En plus, pour qu'un système soit réellement isolé, il faudrait que ses parois soient indéformables. Car, les parois d'un système peuvent être réelles ou imaginaires. Pour le cas de l'univers, le fait qu'il s'étend de plus en plus est une preuve que ses parois sont, non seulement instables mais déformables si on doit les lui concéder. On a donc du mal à appliquer le second principe de thermodynamique à l'univers ; pourtant il serait le seul vrai système isolé. Ce qui signifie qu'il peut échapper au destin fatal qui attend les systèmes isolés, à savoir la mort thermique due au maximum entropique à cause du fait qu'il est un système isolé atypique.

Par ailleurs, un autre modèle affirme que l'univers serait plutôt un système ouvert à cause du fait que celui-ci n'a pas de frontières fixes. Ce modèle est aussi pertinent que le premier. Si l'univers se dilate et gonfle sans cesse, c'est qu'il n'a pas de frontières. Autant mieux le considérer une seule fois comme un système ouvert. Dans ce cas, on ne lui applique pas le second principe. Son entropie serait donc la somme de l'entropie créée et celui de l'entropie reçue. Or, on constate, à l'avenant, que c'est un système ouvert qui n'est pas en contact avec un quelconque environnement extérieur. Du coup son entropie reçue est nulle. Donc, s'il faille considérer l'univers comme un système ouvert, celui-ci serait encore un système ouvert problématique telle que la physique n'en a jamais connu. Car, le principe du système ouvert est d'échanger la matière et l'énergie avec l'environnement. Le qualificatif ouvert décrit le fait que le système est ouvert sur son environnement. Pour qualifier un système de système ouvert, Arthur Shavit et Chaim Gutfinger affirment que :*« Anything outside the boundary of the system is called the*

surroundings or the environment. »[172]Or, pour notre système géant, il manque le facteur environnement qui est important. C'est pourquoi, on ne peut pas, une fois, de plus, poser la formule de l'entropie des systèmes ouverts à l'endroit de l'univers. Si l'univers doit être considéré comme un système ouvert, on doit pouvoir dire que celui-ci est un système ouvert inédit. Cette observation rend les calculs thermodynamiques inapplicables avec une précision accrue. En principe, l'entropie des systèmes ouverts nous donne $\mathbf{S_{créée} = S_{ext} + S_{syst} \geq 0.}$ La formule indique que l'entropie de l'environnement doit être combinée à l'entropie du système pour faire le bilan entropique. Puisque l'environnement fait défaut, le système bien, qu'il soit ouvert n'obéit pas à tous les paramètres d'un système ouvert.

Cela dit, l'univers ne saurait être un système classique ouvert. De ce qui précède, on pourrait dire qu'il est difficile de déterminer une catégorie précise de système pour le système thermodynamique géant qu'est l'univers. En cela, l'univers, en tant que système thermodynamique est problématique. En effet, un système thermodynamique est reconnaissable par ses frontières réelles ou fictives et par son contenu. Arthur Shavbit et Chaim Gutfinger poursuivent en disant ceci:

> If matter is allowed to cross the boundary, the system is referred to as an open system. The open system is contained within a control volume and surrounded by a control surface.The terms open system and control volume are interchangeable.The boundary of the system may be real or imaginary, and it may be stationary or changing with time; it must, however, be well defined at all times.

Pour le cas de l'univers, ces frontières n'existent pas, que ce soit de façon matérielle ou de façon purement théorique. Nous ne reviendrons pas ici sur ce problème de frontières de l'univers que nous avons déjà eu à discuter plus haut sur un double plan philosophique et physique. Nous avons vu que cela s'accompagnait de nombreuses apories à tous les niveaux. On ne peut donc pas imaginer des frontières réelles ou fictives à l'univers, séparant le contenu thermodynamique interne et l'environnement extérieur comme dans n'importe quel système thermodynamique ouvert avec infiltration de la chaleur ou de la matière.

Tout ceci nous amène à postuler l'existence d'un certain système thermodynamique inédit, atypique voire plein de paradoxes, ne pouvant entrer dans aucune catégorie connue. L'univers se refuse donc à toute classification. Il est unique pour ce qu'il est, à savoir l'ensemble

[172]Arthur Shavit and Chaim Gutfinder, *Thermodynamics. From concepts to applications*, CRC Press Taylor and Francis group, 2008, *Op.cit.*, p.6

de tout ce qui existe. Voilà pourquoi son système ne peut être défini. Cette remarque fait que les formules régissant les systèmes thermodynamiques ne sont pas parfaitement fonctionnelles. Elles sont à réinventer ou à accommoder dans un modèle que la science ne répertorie pas. Car, de toute évidence, la science fonctionne avec des catégories ; celles-ci sont de grands ensembles où s'observent des constances, des régularités et des répétitions de phénomènes permettant de dégager des lois qui sont, en réalité, des corrélations décrivant l'état des choses, ou plus simplement les relations entre les choses. (Les faits sont définis par Wittgenstein, dans son deuxième aphorisme notamment au sous-aphorisme 2.1, *comme la substance de l'état des choses ou une connexion d'objets entre eux*[173] En revanche, une chose qui n'entre pas dans une catégorie de faits est encline à donner du vertige au savant.

Pour tirer une conclusion à tout ce qui précède, nous dirions que, d'un système paradoxal, atypique et inédit, l'on ne saurait dégager l'entropie avec une aisance évidente. On devra au contraire la postuler ou l'inférer à travers une démarche parfois pleine de *conjectures ad hoc*[174]. Car, beaucoup de données sont manquantes, et même beaucoup d'irrégularités sont relevées. En fin de compte, l'on se retrouve dans une situation où les formules sont difficilement applicables.

4.2.3. Entre théorie cosmologique et un principe anthropique : la ligne de crête

Toutes ces difficultés que nous soulevons dans ce travail, en lien avec la formulation précise d'une entropie de l'univers comme système thermodynamique, montrent que, lorsque l'on parle de l'univers, généralement l'homme en est aux balbutiements et aux antinomies qui engendrent nécessairement ou très souvent des apories. Parfois, on se perd ; on ne distingue plus nettement entre une théorie scientifique en tant que telle et une interprétation philosophique du monde. D'où la ligne de crête entre une théorie cosmologique (scientifique) et une théorie *anthropique*.

[173] Ludwig Wittgenstein, *Tractatus logico-philosophicus*, traduction française de Gilles Gaston Granger, Gallimard, Paris, 1993, p .33.

[174]Selon Karl Popper, les hypothèses ou conjectures ad hoc qui sont, en fait, des hypothèses arbitraires choisies à dessein pour sauver la théorie. Car, lorsqu'une théorie est élaborée, elle a beau résister aux tests, elle contient toujours des zones d'ombres, qui sont souvent passages en force, où on retrouve des inexpliqués, des injustifiés ou bien des indéterminés sur lesquels la théorie n'en dit pas grand-chose mais dont l'existence est nécessaire pour son élaboration cfKarl Popper (1985), *Conjectures et réfutations. La croissance du savoir scientifique,* Payot., 1985, p. 352.

En effet, parler d'entropie de l'univers, au sens strict, c'est se positionner dans une étude qui a trait à la cosmologie scientifique, c'est-à-dire c'est chercher à comprendre comment l'univers fonctionne du point de vue de la science. C'est la devise du double prix Nobel (de physique et de chimie), Marie Curie qui, dans le triomphe de son savoir affirmait qu'elle a consacré sa vie à percer le mystère de la réalité physique. Elle affirmait : *« je suis heureuse de consacrer ma vie à comprendre le monde ».*[175]Chercher ainsi à comprendre la nature voire la matière, c'est en réalité en faire une ontologie. C'est un travail qui nous a toujours préoccupé depuis le début de cette réflexion qui a débuté sur le grand passage effectué en physique *de la dynamique classique et la thermodynamique des processus de non-équilibre*[176] qui mettait déjà la catégorie fondamentale de l'entropie en avant de la scène comme responsable des processus de non-équilibre. Et maintenant, il s'agit d'établir le rapport entre les entropies locales et l'entropie universelle. En faisant cette ontologie de la matière, il peut se trouver que l'homme adopte une sorte de posture purement scientifique où il est guidé par ses instruments qui créent, entre la nature à observer et lui-même, une sorte de dialogue avec la nature par le truchement des instruments qu'Ilya Prigogine nomme dans *la Nouvelle Alliance "le dialogue expérimental"*. Le dialogue expérimental est celui qui, selon Prigogine, est mené au moyen des instruments. Il suppose donc, d'une part, un sujet équipé d'un arsenal instrumental, et qui a en face de lui une nature, victime des expérimentations de manipulations, de contrôle et de prise de dessus, et d'autre part, une hypothèse élaborée en amont qui guide les phases d'expérimentation en question. On comprend tout de suite, et sans ambages, le type de rapport qui va s'établir : c'est un rapport à sens unique où on cherche à confirmer l'hypothèse qui guide l'expérimentation ; et cette hypothèse est généralement la plus risquée ou la moins probable qui puisse être. On forcera donc la nature à dire oui. Par contre, Einstein nous dit que « *la nature aux questions qu'on lui pose, répond le plus souvent par "non", et, parfois "peut-être" ».*[177]A ce niveau nous pouvons voir que le dialogue expérimental ne nous conduit pas toujours aux certitudes les plus éprouvées.

Le dialogue expérimental est amplement critiqué par Prigogine qui y voit un conditionnement arbitraire de la nature par les instruments qui fait que, très souvent, la nature se cache ou cache ses propriétés intrinsèques devant l'expérimentateur humain. De là, nous

[175]Claudine Douillet, Interview de Marie Curie, *Actualité antisémitisme / racisme, Culture, femmes de parole,* in Magazine, le12 aout 2018 en ligne sur www1.alliancefr.com

[176]Jospin Brice FOE, *De la dynamique classique à la thermodynamique des processus de non-équilibre. Une ontologie de la nature chez Ilya Prigogine*, *Op.Cit*

[177] Einstein cité par Ilya Prigogine et Isabelle Stengers, *Nouvelle Alliance*,*Op.Cit.*,p.80.

pouvons affirmer que le fait d'être suréquipé ne suffit pas pour que l'on accède aux mystères de la nature. En d'autres termes, nos instruments ne nous donnent guère une connaissance totale de l'univers pouvant garantir l'authenticité de la théorie cosmologique du modèle standard. En tout état de cause, il faut reconnaître qu'il y a des réalités auxquelles on ne peut pas facilement accéder par la simple expérimentation. On pourrait ajouter que l'on ne peut pas objectivement expérimenter la nature dans son ensemble étant soi-même un élément de cette même nature. Il faudrait peut-être une intelligence surnaturelle à la dimension de la métaphore du génie de Laplace, être suprahumain capable d'observer l'univers à distance pour parler de lui avec une objectivité totale. La science classique ayant pris conscience de ses propres limites, la connaissance totale de l'univers par le physicien à partir de ses simples calculs s'est avéré être un échec. La science moderne tient plutôt aujourd'hui le langage des incertitudes en science. Que ce soit Ilya Prigogine qui avait tantôt parlé de la fin des certitudes dans un ouvrage éponyme (il s'intitule : *La fin des certitudes*[178]), ou que ce soit Gaston Bachelard qui affirme que la connaissance du réel n'est jamais certaine, c'est-à-dire que, plus on s'approche du réel, plus la marge d'incertitude due à notre ignorance se fait sentir. Il affirme que *« La connaissance du réel est une lumière qui projette toujours quelque part des ombres. Elle n'est jamais immédiate et pleine. »*[179] Nous comprenons que notre connaissance de la nature physique est toujours pleine d'incertitudes. On peut aussi convoquer Bernard d'Espagnat qui montre que le réel n'est pas tout à fait assimilable par l'esprit humain comme cela a semblé l'être, à première vue, par la physique classique. On ne peut espérer en connaître que certaines structures générales. D'où le concept de *réel voilé*[180]. Si, à partir déjà de la compréhension la nature immédiate qui nous entoure, on peut ressortir ce constat, combien plus sera-t-il amplifié à l'échelle de la nature dans sa globalité ? C'est dans cette mesure que la cosmologie scientifique du modèle standard place elle-même le seuil infranchissable qui marque la limite de nos connaissances que l'on appelle *« l'horizon des évènements »*. Dans un article de cosmologie paru dans la revue scientifique *Futura,* on peut lire : *« De manière générale, pour un physicien et en relativité restreinte ou générale, le terme horizon des événements renvoie à une limite. Celle de l'univers observable. L'horizon des*

[178] Prigogine, La fin des certitudes. Ouvrage dont l'enjeu majeur porte sur la fin du déterminisme en science défendue naguère par la science classique, et sur le début de l'indéterminisme qui est au cœur même de la science moderne.

[179]Gaston Bachelard, *La formation de l'esprit scientifique. Contribution à une psychanalyse de la connaissance objective (1934)*, version numérique par Jean-Marie Tremblay, Québec, 2015 p. 16.

[180] Bernard d'Espagnat, *Le réel voilé. Analyse des concepts quantiques*. Fayard, Paris, 1994, p.

événements correspond à la plus grande distance que la lumière émise maintenant pourra atteindre dans le futur. Une limite au-delà de laquelle les événements ne peuvent donc pas affecter un observateur. »[181]

L'horizon des évènements limite en vertu du fait qu'il y aura toujours une partie de l'univers, de plus en plus grande à mesure que le temps passe qui nous échappera toujours. L'univers dans sa globalité reste donc un mystère pour la science. L'horizon des événements affirme que notre connaissance scientifique de l'univers est une vue très partielle voire très parcellaire de l'univers, car il existe une limite infranchissable. L'horizon des évènements est une notion relative dans la mesure où elle dépend de la position de l'observateur dans l'univers. Illustrons cela par l'expérience de pensée suivante : supposons deux observateurs sur deux galaxies suffisamment éloignées l'une de l'autre dont la distance d'éloignement serait supérieure à la vitesse de la lumière (ce n'est pas leur mouvement en soi qui est supérieur à la vitesse de la lumière, ce qui serait contradictoire à la relativité restreinte où la vitesse de la lumière est la constante physique qui sert à mesurer les autres vitesses de propagation, mais c'est l'espace-temps qui se dilate), ces observateurs ne se verront jamais car les deux galaxies se situent réciproquement au-delà de l'horizon des évènements. Soit la relation $\mathbf{v=H_o.r}$, souvent aussi appelée relation Hubble-George Lemaître du nom de ses auteurs,où v est la vitesse de récession de la galaxie ; et r est sa distance qui sépare les deux galaxies et H_o est la constance de Hubble soit $3{,}26x10^6$ années-lumière. Si rest très grand, le produit $\mathbf{H_o.r}$ le sera aussi et nécessairement on aura $\mathbf{v>c}$, avec c la célérité de la lumière dans le vide**.** Les deux observateurs situés dans les cas galaxies éloignées l'une de l'autre s'éloignant à une vitesse supra lumineuse ne pourront jamais se voir**.** Nous pouvons lire dans un magazine d'astronomie ce qui suit :

> Reprenons la relation de base $\mathbf{v=H_o.r}$ et supposons que v=c, vitesse de la lumière. On obtient alors une distance critique appelée « la distance de hubble » notée **rH**, elle vaut 15 milliards d'années divisée par c, donc 15 milliards d'années-lumière. Deux galaxies séparées d'une distance supérieure à **rH** ne peuvent se voir puisque les deux galaxies se séparent à une vitesse excédante celle de la lumière.[182]

Au-delà de 15 milliards d'années-lumière, l'univers est un vaste champ inconnu et inconnaissable. Personne ne pourrait donc parler sereinement de ses bornes, que ce soit la borne supérieure ou la borne inférieure.

---

[181] Qu'est-ce que l'horizon des événements ? inhttps://www.futura-sciences.com/sciences /definitions/physique-horizon- évènements-4193/

[182] *La constante de Hubble -L'Astronomie Afrique* in https://lastronomieafrique.com/la-constante-de-hubble/

Au niveau de la borne inférieure, l'horizon des évènements c'est tout ce qui se situe avant le big bang, auquel nos instruments ne peuvent avoir accès. Au niveau de la borne supérieure, c'est également tout ce qui se trouve au-delà de l'univers observable, c'est-à-dire là où la lumière émise par notre galaxie ne peut parvenir, soit là où nos instruments s'arrêtent. Mais, l'ambition de l'homme étant toujours démesurée au-delà de ses propres capacités, l'homme ne s'avoue jamais vaincu devant ces limites. Pour s'en tirer, il construit *des hypothèses ad hoc*. Une *hypothèse ad hoc*, comme nous l'avons dit plus haut,est celle qui permet un passage en force sans vraiment prouver la pertinence des affirmations, pourvu qu'on sauve la théorie générale. Ainsi, nous avons vu que, à un moment donné, parlant de l'univers, les principes thermodynamiques devaient être reformulés à dessein pour qu'ils puissent correspondre mathématiquement à ce que nous pensons de notre univers. L'analyse de ces reformulations, parfois tirées par les cheveux, nous a amené à dégager des pétitions de principes où l'on était obligé parfois de faire des passages en force comme le fait de prendre la densité pour la pression, en parlant de la présence d'un ou de deux atomes dans le vide interstellaire. A défaut de mesurer la pression de l'univers, on en a mesuré la densité, afin de sauver la théorie. Car, en réalité, il faut une force qui presse pour parler de pression. Par conséquent, par défaut de barrières, on ne saurait concevoir, à l'échelle globale, une force centrifuge qui repousse les parois thermodynamiques de l'univers, et par conséquent, on ne peut pas strictement parler de pression.

Qu'à cela ne tienne, puisqu'il faut sauver la théorie, on tolère ces *conjectures ad hoc*. Le plus intéressant étant que l'on tranche en faveur d'une catégorie connue pour éviter toute errance intellectuelle si l'univers ne correspondait à aucune des catégories thermodynamiques déjà recensées par la physique. Le problème réel est que, la science se constitue à partir des phénomènes qui peuvent se répéter pour établir des lois et non pas à partir d'une singularité. Ainsi a-t-on pu classer l'univers parmi les systèmes isolés pour lui appliquer le second principe de thermodynamique incidemment, comme on le voit dans beaucoup de manuels de physique où, s'appuyant sur Rudolf Clausius, il est dit que l'entropie de l'univers croît comme dans n'importe quel système isolé. Il convient pourtant de remarquer en toute objectivité que cela est très délicat à soutenir. Nous pencherions plutôt pour un système à part, avec des spécificités inédites.

Tout cela montre que l'homme a tendance à s'écarter de l'objectivité scientifique en tant que telle pour prendre une place centrale en dictant leurs lois aux choses ou en imposant à la matière ses propriétés. On passe donc d'un principe cosmologique pur à un principe anthropique

ou anthropocentrique où c'est l'homme qui parle, un homme qui n'est plus à la périphérie pour voir comment les choses se déroulent, mais un homme qui a prétendument pris la place centrale dans l'univers en tant qu'être conscient et doué de raison et qui dit maintenant comment, lui, comprend la façon dont les choses se déroulent. Le principe anthropique en lui-même ne fait pas problème dans la mesure où il souligne la centralité de l'homme dans l'histoire et la connaissance de l'univers. Le principe anthropique est un principe épistémologique selon lequel les observations de l'univers doivent être compatibles avec la présence d'un observateur étant une entité biologique douée d'une conscience. On ne peut pas concevoir le réel sans une présence humaine pour l'exprimer. Le problème réel est l'abus du principe anthropique. Il n'est pas exagéré de dire que ce que nous connaissons de l'univers est parfois lié à notre position de sujet raisonnable dictant, arbitrairement ou non, à la nature ses lois et ses propriétés. Ce qui est à l'opposé du solipsisme scientifique où la présence d'un observateur humain doué de conscience ne change pas la nature ou la réalité du monde physique. Einstein affirmait à cet égard :

> Il y a quelque chose comme l'état réel d'un système physique : lequel état existe objectivement, indépendamment de toute observation ou mesure, et peut en principe être décrit par les moyens de la physique.... Nul ne doute, par exemple, qu'à un instant déterminé le centre de gravité de la lune n'occupe pas une position déterminée, en l'absence, même, d'observateur.[183]

Beaucoup d'auteurs, à l'instar d'Ilya Prigogine, attirent notre attention sur cet abus du principe anthropique. Il est, en fait, selon certains auteurs, une faute de jugement ou simplement une pétition de principe. La pétition de principe est une faute logique qui consiste à admettre dans les principes ce que l'on doit démontrer. Dire que l'univers est rangé dans telle ou telle autre catégorie de système sans le démontrer comme si cela allait de soi, par simple rapprochement avec ce que nous connaissons à partir de notre expérience immédiate, est une prétention désobligeante. Si le principe anthropique est sensé d'un certain point de vue, du fait que la matière n'a pas de sens sans cette conscience intelligente qui l'observe et qui la décrit, il pourrait, par ailleurs, se gonfler de prétentions qui impliquent des conjectures non réfutables dans le sens poppérien du terme. Or, depuis Popper, on sait qu'une conjecture scientifique doit absolument être réfutable. Il affirme que *« Ceux parmi nous qui refusent d'exposer leurs idées au risque de la*

[183] Albert Einstein cité par Bernard d'Espagnat, *A la recherche du réel* in*Journal de Physique Colloques*, Université de Paris Sud, Paris, 1981, 42 (C2), pp.C2-99-C2-113.

réfutation ne prennent pas part au jeu scientifique. »[184] Dans notre cas, ces conjectures classant l'univers dans telle ou telle autre catégorie thermodynamique pourraient bien être des conjectures irréfutables parce que non vérifiables. En effet, ce sont des conjectures dont les énoncés théoriques ne peuvent être expérimentalement réfutés ou approuvés par les faits pour correspondre à des énoncés d'observation. Or, bien que l'homme soit le centre de l'univers, d'après le principe anthropique, il sait qu'il est une infime entité finie dans l'immensité infinie de l'univers. Il ne peut donc pas, en principe parler de façon à la fois convaincue et convaincante de l'univers dans ses plus profonds retranchements. Il se pose un réel problème de conceptualisation des limites de l'univers. Peut-on imaginer les limites de l'univers ?

Philosophiquement cela pose un problème. Car, parler des limites de l'univers, c'est le borner dans l'espace et dans le temps. Or, l'espace et le temps existent-t-ils en dehors de l'univers qui les contient ? Il est impossible de poser un temps et un espace sans poser d'abord l'univers. L'absence ne se conçoit que par rapport aux données empiriques du contenu de l'univers. Comme le montre Bergson, l'absence est toujours absence de quelque chose. Par ailleurs, le néant comme absence de tout n'est pas conceptualisable ; l'idée de rien étant impensable. Il dit : *« l'idée de Rien, si l'on prétend y voir celle d'une abolition de toutes choses, est une idée destructive d'elle-même. »*[185]On ne saurait donc poser le temps et l'espace en dehors de l'univers. Il est impossible matériellement ou théoriquement d'envisager un temps intemporel ou un espace non-spatial au-delà des frontières de l'univers vers lesquels il poursuit son expansion.

Physiquement, cela pose également un problème au niveau des calculs. Quand on rentre vers le passé, c'est-à-dire vers la borne inférieure, après les derniers instants à l'échelle de Planck, les grandeurs physiques semblent prendre des valeurs infinies qui ne permettent guère les calculs. Il est donc impossible en rentrant dans le passé de retrouver l'instant zéro où le temps et l'espace n'existent pas. La physique ne commence qu'après que l'instant zéro ait été préalablement franchi, quand l'espace et le temps s'étaient déjà créés et que la flèche du temps[186] avait déjà été lancée. Les calculs sont presque troublants du point de vue mathématico-physique,

---

[184] Popper, Popper, K (1985). *Conjectures et réfutation. La croissance du savoir scientifique*, Payot, p.286.

[185] Henri Bergson, *L'évolution créatrice* (1907), Édition électronique (ePub, PDF) v.: Les Échos du Maquis, avril 2013, p. 198.

[186] La flèche du temps distincte du temps lui-même renvoie à la flèche des événements qui ont lieu dans le temps. A l'instant zéro, il n'y a donc encore ni temps, ni espace et aucun évènement n'a encore lieu.

car la théorie de la relativité générale qui rend compte de l'espace-temps et de son contenu ne fonctionne plus. Cet instant est une véritable aporie à cause du fait que les grandeurs physiques usuelles prennent des valeurs infinies : la courbure de l'espace-temps prend une valeur infinie, la densité prend une valeur infinie, la chaleur également. Gabriel Veneziano, cosmologiste affirme : *« En projetant le film de l'histoire cosmique à l'envers, les galaxies se rapprochent les unes des autres jusqu'à se rejoindre en un point infinitésimal nommé : singularité. Toutes les galaxies- ou plutôt leurs précurseurs – se retrouvent dans un volume nul. La densité, la température, mais aussi la courbure de l'espace-temps deviennent infinies. »* [187] Or, l'on ne peut pas manipuler des valeurs infinies. Car l'infini n'existe pas en soi. Du point de vue mathématique, il traduit l'impossibilité de nos calculs d'atteindre certaines grandeurs incommensurables.

La théorie de la relativité générale se trouve donc dos au mur. L'instant zéro est posé comme un instant mystérieux renfermant les plus grandes antinomies et contradictions jamais observées en physique. Voilà ce que rapporte un article sur l'origine de l'univers :

> Pour s'approcher (du point où les rapports analogiques s'estompent, où la singularité apparaît), il faut inventer de nouvelles théories. En fait, si près de l'instant zéro – moment primordial où rien de ce que nous connaissons, matière, temps, espace, n'existait – se présente comme le lieu de tous les mystères. C'est le point où la relativité générale d'Einstein – l'une des doctrines physiques les plus solides et les plus vérifiées par l'expérience- perd de son sens. Les effets de la mécanique quantique – l'autre grand édifice du XXe siècle- s'appliquent de plein droit. Ils disloquent la courbure de l'espace et du temps. Si bien qu'aucun mot, aucun vocabulaire, ne dépeint avec vigueur ce qui s'est tramé…. Les concepts manquent. Les outils mathématiques sont à inventer. On appelle cette zone de méconnaissance et d'ignorance, l'"ère de Planck"[188]

Relevons un tant soit peu quelques-unes de ces antinomies contenues dans l'instant zéro. On parle d'un volume nul dans une densité infinie ou d'entropie nulle dans une température élevée à l'infinie. Or, une entropie nulle ne peut s'obtenir qu'à température 0 K qui est la température la plus basse jamais atteinte. En effet, si le big bang est un atome, comme l'atteste cet article *« le chanoine belge George Lemaitre aura l'intuition d'un univers primitif réduit à un seul "atome d'énergie. »*[189], alors la formule de Boltzmann **S=Kb.log (Ω)** donne un résultat nul. Donc S=0. Donc l'entropie du point initial était nulle.

---

[187] Gabriel Veneziano, *L'univers avant le Big Bang* in https://www.pourlascience.fr/sd/cosmologie/l-univers-avant-le big-bang-2971 .php

[188] *L'origine de l'univers* in https://www.cnrs.frcw/dossiers/dosbig/decouv/xchrono/origine/niv1_1.htm, *op.ct.*

[189] *L'origine de l'univers* in https://www.cnrs.frcw/dossiers/dosbig/decouv/xchrono/origine/niv1_1.htm

Si la relativité générale qui décrit le monde macroscopique de façon précise ne peut plus décrire la singularité du point initial, elle est remplacée par la théorie quantique probabiliste qui s'accommode bien des entités infinitésimales. Mais, comme on s'y attendrait, elle nous plonge dans le monde des probabilités dont l'amplification conduit à l'incertitude.

En un mot, la borne inférieure de l'univers nous échappe au tant que la borne supérieure comme nous l'avons mentionné. C'est pourquoi la théorie cosmologique balance très souvent vers un principe anthropique qui s'avère,davantage, plus philosophique que scientifique.

De toute évidence, il convient de retenir qu'un ensemble de lois déterministes ont présidé à un moment donné à l'apparition de l'homme alors que l'histoire de l'univers était vieille de plus de 12 milliards d'années à peu près, et depuis lors, l'univers n'a cessé de continuer son expansion à la vitesse relative dite vitesse de Hubble soit environ 67Km /s/mégaparsec/. Selon les dernières estimations, cela voudrait dire qu'à une distance d'un mégaparsec soit 3,26 millions d'années-lumière, l'univers gonfle de 67 km à chaque seconde à telle enseigne que, si on considère chaque seconde depuis 13 milliards d'années environs que tout cela a commencé, le chiffre est inouï. Et on peut conclure que ses confins ne sont pas à la portée de nos observations et nous ne pourrions rien savoir de ce qu'il en est.

CHAPITRE 5 : OBSTACLES MÉTHODOLOGIQUES DE LA VÉRIFICATION D'UNE ENTROPIE GÉNÉRALE

La deuxième partie de ce travail pose de façon générale les difficultés et les limites de la définition de l'entropie de l'univers ou de l'entropie générale. Au premier chapitre, nous avons pris en compte les difficultés liées aux paramètres thermodynamiques qui entrent en ligne compte des calculs thermodynamiques telles que les variables d'état intensives ou extensives, et bien d'autres paramètres qui déterminent l'état d'un système. On peut dire qu'il s'agissait de difficultés propres au domaine ou difficultés d'ordre techniques qui mettent mal à l'aise un féru de thermodynamique. Dans ce chapitre, nous allons-nous attarder aux difficultés liées à la démarche empirique et expérimentale en générale que nous avons formulée sous le concept des obstacles méthodologiques à la définition de l'entropie. Ces obstacles sont pour la plupart liées aux procédures, aux cheminements expérimentaux, aux manipulations et parfois aux tests en vue de formuler une entropie générale. Mais, nous verrons que tout ceci ne respecte pas très souvent les canons méthodologiques qui sont parfois réélaborés à dessein face à la situation inédite d'un *objet sui generis*, à savoir qui n'entre dans aucune catégorie scientifique. On tombe alors sur beaucoup de déconvenues. La préoccupation qui va guider notre réflexion est celle de savoir si une entropie universelle est mesurable expérimentalement.

5.1. De la dissymétrie entre énoncés théoriques et énoncés d'observation

5.1.1. De l'aporie de l'élaboration des énoncés universels aux obstacles d'une théorie du « tout ».

De façon générale en sciences, on procède souvent par deux types d'énoncés fondamentaux, à savoir les énoncés théoriques et les énoncés d'observation. Les énoncés théoriques relèvent d'une théorie préexistante ou présupposée. C'est l'ensemble des énoncés sous la forme d'un langage logique constituant le contenu d'une théorique scientifique. Un énoncé comme $E = MC^2$est lourd de présupposés théoriques. Ils présupposent la notion d'énergie (cinétique) ainsi que celle de masse sans oublier la notion de célérité des photons dans le vide, et enfin de compte, il présuppose la théorique qui va avec tout cela. L'énoncé théorique sert donc de préalable à l'énoncé d'observation qui constitue le socle empirique de l'énoncé théorique. Ce

que nous voudrions signifier par-là est que toute théorie a vocation à être confirmée ou vérifiée. Cela dit, il y a donc toujours une théorie qui précède l'observation. Ainsi fonctionnent les sciences expérimentales. Les énoncés théoriques ne sont pas directement vérifiés sinon par le truchement des énoncés d'observation. Ces dernières quant à elles sont directement vérifiées à l'opposé des premières. Pierre Sagaut, philosophe des sciences, nous édifie à ce sujet quand il affirme :

> Par définition, les énoncés d'observation sont directement vérifiables. Ils formeront donc la base de la théorie scientifique. Pour Carnap, c'est en vertu de cette concordance que les énoncés d'observation peuvent être tenus pour vrais et qu'ils acquièrent un sens, lorsqu'ils sont vérifiés. Les énoncés théoriques ne sont pas directement vérifiables : ils ne peuvent être mis à l'épreuve que par le biais des énoncés d'observation que l'on peut déduire d'eux.[190]

Nous pouvons remarquer qu'il y a un lien infrangible entre énoncés théoriques et énoncés d'observation. Les seconds sont déduits des premiers. Alors que les premiers ne sont pas directement vérifiables en vertu de leur caractère purement théorique, les seconds le sont à cause de leur caractère empirique. Le plus important, pour nous, est de souligner ce lien infrangible dans les sciences dites expérimentales comme la physique, qui sont bâties à partir de ces deux pôles d'énoncés. Une science expérimentale s'assurera donc toujours d'établir une continuité entre ces deux types d'énoncés pour construire ses théories. A partir donc énoncés théoriques, on doit aboutir aux énoncés d'observation pour valider la théorie. Or, pour ce qui est de la thermodynamique universelle, il se peut qu'il soit impossible de vérifier certains énoncés d'observation. Car, pour rappel, ces derniers sont censés être directement vérifiables. Mais, avec la thermodynamique universelle, il apparaît comme une sorte d'achoppement quant au fait de vérifier certaines affirmations à l'échelle universelle. Car, si nous définissons l'univers comme un système, et si nous définissons le contenu de ce système comme l'ensemble de tout ce qui existe, on a du mal à englober tout dans une seule théorie et de l'observer expérimentalement. Une thermodynamique universelle correspondrait donc à une théorie du tout. Mais, parler de « théorie du tout » revient à se demander à quoi renvoie ce « tout ». Si c'est l'ensemble de tout ce qui existe, est-il connaissable ? L'homme peut-il connaitre tout ce qui existe et lui bâtir une théorie fiable ? Peut-il l'observer expérimentalement pour valider ou invalider tel ou tel énoncé théorique ? Si les réponses à ces questions sont négatives, il est clair que nous nous embarquons dans une aventure risquée où il y aura des énoncés théoriques privés de leurs parèdres

[190] Pierre Saugaut, *Introduction à la pensée scientifique moderne,* Institut Jean Le Rond d'Alembert, Université Pierre et Marie Curie – Paris 6, pierre.sagaut@upmc.frhttp://www.lmm.jussieu.fr/~sagaut, p.106.

scientifiques, à savoir les énoncés d'observation. Toutes choses qui brisent le lien infrangible entre les énoncés théoriques et les énoncés d'observation. D'où un rapport asymétrique entre ces deux pôles des sciences expérimentales. Nous voilà embarqués dans une pétition de principe, à savoir une erreur logique où il y aura des déclarations sans base empirique fiable ou pour parler simplement, il y aura des affirmations gratuites. Einstein, en élaborant la théorie de la relativité générale avait prévu des ondes gravitationnelles comme preuve de sa théorie. Ce n'est que plus tard que les ondes gravitationnelles furent observées validant ses énoncés théoriques. Les ondes gravitationnelles sont des ondes qui émanent des plus grandes explosions ou des plus grands évènements violents de l'univers et se propagent à très haute vitesse et à grande distance de leur point de formation agitant le tissu de l'espace-temps et engendrant un mirage gravitationnel. Il a fallu les observer pour corroborer la théorie. Les énoncés d'observation sont donc très déterminants dans la mesure où on s'en sert toujours pour valider une théorie préexistante ou présupposée. Tant que les faits décrits par la théorie ne sont pas encore observés, la théorie demeure une « conjecture audacieuse »[191], pour reprendre les termes de Karl Popper. Un énoncé théorique qui n'a jamais été vérifié ne sera jamais considéré comme vrai, mais toujours tout simplement comme *une conjecture ou une hypothèse audacieuse*. Comme dans notre étude, il est impossible à l'homme de se prononcer sur l'univers comme l'ensemble de « tout » et de l'observer en revanche sans biaiser, il se peut qu'on en reste à de purs énoncés théoriques qui risquent de n'avoir jamais la chance d'être mise à l'épreuve de l'observation empirique. Car, de toute évidence, comme nous l'avons dit, il y a des choses que l'homme n'aura jamais la chance de vérifier, ni même d'apercevoir.

Du point de vue de la logique, une pareille théorie du « tout » sans possibilité d'observation empirique ne serait qu'une pétition de principe ou simplement une erreur de raisonnement, comme nous venons de le montrer. Et du point de vue méthodologique, une pareille théorie du « tout » sans souci de lier énoncé théorique et énoncé d'observation court le risque de constituer, au final, une conjecture ad hoc, c'est-à-dire une suite d'arguments non justifiés et qui ne le seront peut-être jamais à l'état actuel de nos connaissances et de nos outils.

[191]Karl Popper est un épistémologue qui envisage un fonctionnement de la science à travers deux catégories significatives : une science prudente (qui s'articule autour des hypothèses tout aussi prudentes) et la science audacieuse (qui s'articule autour des hypothèses audacieuses, à l'avenant). Si le progrès est l'objectif visé dans la recherche scientifique, il pense que les vrais moteurs de ce progrès sont les falsifications des conjectures prudentes et les corroborations de conjectures audacieuses**,** car ces deux procédés nous apprennent beaucoup en prenant le risque d'apporter une plus-value s'ils s'avéraient confirmés.

Ils resteront donc toujours au stade des conjectures ad hoc, à savoir des conjectures provisoires permettant seulement de sauver la théorie. Dans l'histoire des sciences, les exemples les plus célèbres de ces conjectures ad hoc sont l'invention du clinamen par Epicure et la postulation du Vulcain par Urbain Le Verrier.

Le clinamen d'Epicure est une catégorie arbitraire imaginée pour justifier une légère déviation des atomes dans leur chute horizontale pour former les corps. Car, sans cette déviation si infime soit-elle, la vie serait impossible si les atomes tombaient éternellement en ligne droite. Prigogine affirme à propos :

> Epicure fut le premier à dresser les termes du dilemme auquel la physique moderne a conféré le poids de son autonomie. Successeur de Démocrite, il imaginait le monde constitué par des atomes en mouvement dans le vide. Il pensait que les atomes tombaient tous avec la même vitesse en suivant des trajets parallèles. Comment pouvaient-ils alors entrer en collision ? Comment la nouveauté, une nouvelle combinaison d'atomes pouvait-elle apparaître ?[192]

Au vu de cette incompatibilité entre la croyance déterministe de l'époque et la réalité de la vie qui fait appel à la nouveauté, la créativité, la complexité, Epicure inventa le clinamen pour résoudre l'énigme de formation des corps par la déviation des atomes. Plus tard, on se rendra compte que les atomes ne tombent pas en ligne droite pour subir de légères déviations mais que la nature est chaotique. Les atomes sont en train de subir des chocs, des entrechocs, des collisions et des décolissions interminables.

Quant au Vulcain, constatant les irrégularités de l'orbite de Mercure, et appliquant les lois de la mécanique newtonienne, Urbain La Verrier postula l'existence d'une planète imaginaire, du nom du Vulcain qui justifierait ces irrégularités par rapport au principe de l'influence gravitationnelle des corps massiques sur les corps moins massiques. Mais, ce Vulcain n'a jamais été trouvé, et son existence fut comptée comme une conjecture ad hoc. Plus tard, on se rendra compte qu'il n'en était rien. Les irrégularités étaient davantage dues à la courbure de l'espace-temps expliquée par la relativité générale d'Einstein.

Revenant sur la thermodynamique universelle qui implique le calcul de son entropie, beaucoup d'énoncés peuvent prendre le statut de conjectures ad hoc, à cause du fait qu'ils ne possèdent pas de base empirique soit pour les observer ou pour les vérifier. Ils deviennent donc

[192]Ilya Prigogine, *La fin des certitudes, Op.Cit.,* p.17.

problématiques. Une théorie qui engloberait tout l'univers reste donc une théorie très précaire. Les cosmologistes sérieux n'ont pas la prétention de nous parler de la totalité de l'univers. Ils se limitent dans le temps et l'espace. Ils nous en parlent souvent en termes de l'univers connaissable, avec pour borne supérieure l'horizon cosmologique à peu près à 46,5 milliards d'années-lumière. Au-delà de cela, on n'en sait rien, on ne voit rien et on ne peut rien dire. Et pourtant ce dont on ne peut parler, fait bien partie du « tout ». Mais, il n'est pas malheureusement pris en compte dans la prétendue théorie du « tout ».

Tout ceci nous amène à comprendre que, non seulement, une seule théorie physique ne peut pas rendre compte de la totalité du réel pour pouvoir caractériser l'univers qualitativement ou quantitativement, de telle enseigne que l'on puisse se prononcer infailliblement sur l'entropie générale. C'est pourquoi les valeurs assignées à ces variables thermodynamiques varient constamment et sont très souvent discutables. Il reste, d'ailleurs, à savoir si elles sont isotropes, c'est-à-dire identiques dans toutes les directions observables de l'univers. La réponse pourrait être négative. On se rend compte que cela n'est pas toujours le cas. La densité qui est le nombre de particules par volume n'est pas identique partout dans l'univers. Il en est de même de la température qui ne saurait être la même dans toutes les directions. Il y a bien des zones très froides de l'univers tel que le « cold spot » découverte en 2004, située entre 6 et 10 milliards d'années-lumière de la terre, une région d'un milliard d'années-lumière de diamètre et un véritable mystère. On l'appelle *la nébuleuse du boomerang* dont la température est légèrement au-dessus du zéro absolu (-272^{o} C) ; il y a également des zones très chaudes de l'univers tel que le cœur du soleil qui peut atteindre une température des 15 millions de degrés Celsius. Alors que l'explosion d'une supernova peut générer des températures supérieures à 100 milliards de degrés Celsius. Nous pouvons avoir ces chiffres dans un blog astronomique rapportant l'endroit le plus froid et l'endroit le plus chaud :

> La surface du soleil a une température d'environ 5700oc, et le cœur du soleil d'environ 15 millions de ^{o} C, bien que la température dans la couronne du soleil puisse atteindre plus de 2 millions de ^{o} C. Les étoiles naines rouges et géantes rouges ont généralement des températures de surface comprises entre 2500^{o} C et 3500^{o} C. Les étoiles supergéantes et hypergéantes bleues ont des températures de surface comprises entre 3500^{o} C et 35 000^{o}C. L'explosion d'une supernova peut générer des températures supérieures à 100 milliards de ^{o} C.[193]

[193] https://lepetitastronaute.fr/blog/lendroit-le-plus-chaud-et-le-plus-froid-de-lunivcers/

Tous ces détails nous permettent simplement de prendre conscience que les variables d'états ne sont pas isotropes dans toutes les directions de l'univers. Ainsi, on y retrouve des zones très froides, des zones moyennement froides, des zones très chaudes et des zones moyennement chaudes. Il existe également des endroits de haute pression et des endroits de basse pression, de même qu'il existe des zones où la densité de la matière est plus forte que dans d'autres. Il apparaît donc évident que les calculs thermodynamiques vont nécessairement prendre un coup, l'univers n'étant pas identique à lui-même dans toutes les directions. On ne peut que travailler avec des variables approximatives ou consensuelles. Dans une moindre mesure, on pourrait prendre des valeurs moyennes. Toutes choses qui pourraient biaiser les résultats. La question que l'on se pose actuellement est celle de savoir si on peut travailler avec les paramètres qui sont à notre échelle, à défaut de prétendre travailler avec des paramètres universels, pour ensuite inférer à l'univers comme dans la méthode inductive pour résoudre le problème ?

5.1.2. Le mythe de l'universel : ruses méthodologiques et risques d'une induction amplifiante

L'accès à l'universel est un rêve qui n'a cessé de bercer les chercheurs de tous les temps et de toutes les époques. Pour Aristote, le sage c'est celui qui sait tout dans la mesure du possible. Aristote affirme que : *« Et d'abord, nous concevons le philosophe, surtout comme connaissant l'ensemble des choses, autant que cela est possible, mais sans avoir la connaissance toute de chose »*[194]. Si ce rêve a toujours habité l'homme, il est vrai que celui-ci ne se réalise pas à l'épreuve des faits. Le désir de la connaissance universelle demeure un rêve, une quête inachevée et un idéal jamais atteint.

Connaitre l'ensemble des choses pour le philosophe grec Aristote, c'est connaître le réel jusque dans ses derniers retranchements. Le sage serait alors l'homme qui a un regard cosmique sur l'ensemble des choses qui existe, sur tout l'universel. Le sage aristotélicien accomplirait le rêve de Pierre-Simon de Laplace, à savoir qu'il aurait une connaissance totale et parfaite de l'univers dans les états passés, présents et futurs. Il affirme ceci :

> Une intelligence qui, à un moment donné connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de

[194] Aristote, *Métaphysique*, traduction d'Alexis Pierron et Charles Zevort, Joubert-Librairie-Editeur, 1840, livre A, II, 982b

> l'univers et ceux du plus petit atome ; rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux. L'esprit humain offre, dans la perfection qu'il a su donner à l'astronomie, une faible esquisse de cette intelligence. Ses découvertes en mécanique et en géométrie, jointes à celle de la pesanteur universelle, l'ont mis à porter de comprendre dans les mêmes expressions analytiques les états passés et futurs du système du monde. En appliquant la même méthode à quelques autres objets de ses connaissances, il est parvenu à ramener à des lois générales, les phénomènes observés, à prévoir ceux que des circonstances données doivent faire éclore.[195]

C'est la métaphore d'une intelligence omniscience souvent appelée Génie de Laplace ou Démon de Laplace qui caresse le rêve d'une connaissance absolue et totale. Mais, ce rêve aristotélicien, bien relayé au 19e siècle par Pierre-Simon Laplace accuse une fin de non-recevoir. Il est resté l'expression d'un vœu pieux, l'universel étant inaccessible à l'homme. Connaitre tout, bâtir une théorie du tout, voilà des défis auxquels les hommes de science ont toujours fait face sans pourtant les relever. En physique par exemple, une « théorie du tout » a été envisagée depuis que les deux grandes théories de la physique (relativité générale d'Einstein qui rend compte de tout le réel à notre échelle, et la physique quantique qui rend compte de tout le réel à l'échelle des particules atomiques) ont montré chacune ses limites : la relativité générale ne pouvant pas expliquer le monde atomique et subatomique de même que la physique quantique ne pouvant pas expliquer les phénomènes macroscopiques. Dès lors, les physiciens ont orienté les recherches vers la théorie du tout, à savoir une théorie qui rendrait compte à la fois du monde macroscopique et du monde microscopique. Une telle théorie n'a pas encore été trouvée dans le modèle standard. Bien plus encore, au-delà du fait que cette théorie n'arrive pas à unifier les deux grandes théories de la physique qui permettent de comprendre le microscopique et le macroscopique, une théorie du tout au sens pur du terme n'est pas pensable, c'est-à-dire une théorie qui prétendrait tout embrasser d'un seul coup : une théorie universelle basée sur une science universelle. Pour parer à cette difficulté, l'homme sait souvent ruser méthodologiquement. Cette ruse méthodologique revient à une induction excessive.

En effet, l'induction est un raisonnement logique moins efficace en termes d'assurance que la déduction. Car, avec l'induction le risque d'erreur est élevé. Or, la déduction, très simplement dit, consiste à dire la même chose c'est une sorte de répétition qui va en se subtilisant. D'où un risque moins élevé d'erreur. Néanmoins, l'induction est

[195]Laplace Pierre-Simon, *Essai philosophique sur les probabilités*, 6eme édition, Bachelier, Paris, 1840, p.4.

une méthode scientifique de nature vérificationniste qui, malgré ses limites est d'usage. D'où le principe d'incertitude en science. Car, les vérités scientifiques sont des vérités faillibles parce que, obtenues par induction, à défaut d'expérimenter le réel à l'échelle universelle. Ainsi, le fameux rêve de l'universel va se muter en mirage de l'universel voire faux mirage de l'universel. Qu'est-ce le mirage de l'universel ? Le mirage de l'universel dont parle Ilya Prigogine, c'est le fait de prendre le particulier et d'en inférer l'universel comme dans la méthode inductive. Dans une précédente étude, nous montrions que l'induction est sujette aux erreurs. Voici ce que nous disions à propos :

> C'est un mirage pour le sujet ou simplement une illusion parce qu'on progressait par induction. L'induction, pense Karl Popper, aux dépens de cercle de Vienne en général, est sujette aux erreurs. Car, un cas particulier qu'on généralise par *pétition de principe*[196] ne saurait rendre compte de la généralité ou de la totalité des cas inférés à partir du seul cas. Nous pensons que l'induction agit par pétition de principe c'est-à-dire par absence de justification, par le fait qu'elle affirme ce qu'il faut démontrer. Or, il est établi en logique qu'un tel procédé heuristique est erroné du point de vue épistémologique. Car, la conclusion dans la logique classique ne doit pas être plus grande que la prémisse. Si un homme est méchant, cela ne doit pas induire que tous les hommes sont méchants. Cela dit, inférer une conclusion à l'échelle universelle à partir des expérimentations locales, c'est une erreur logique et par conséquent, une erreur épistémologique[197].

Dans cette dernière citation, nous décrivons le faux mirage de l'universel comme une erreur épistémologique d'origine inductive. Aussi, nous pouvons ajouter qu'elle est également une erreur méthodologique du moment où nous pouvons la ranger dans les ruses méthodologiques : on travaille sur une partie de l'ensemble mais on tire des conclusions sur l'ensemble.

Cela dit, revenons-en aux problèmes thermodynamiques proprement dits. Ce que nous disons de l'univers en termes de systèmes thermodynamiques, nous le disons très souvent par rapport aux expériences faites sur les systèmes thermodynamiques à l'échelle locale. La preuve de ce que nous avançons est que, pour le modèle standard, l'univers est un système isolé. Pourtant, nous avons montré qu'un système isolé est un système qui ne communique avec aucun autre système du fait de ses frontières adiabatiques et indéformables, et que, fort de tout cela, son entropie devrait être croissante jusqu'au seuil maximal d'équilibre thermodynamique. Or,

[196] La pétition de principe est une erreur de raisonnement logique dans laquelle on considère comme admis ce qu'on doit démontrer.

[197]Jospin Brice FOE, *De la dynamique classique à la thermodynamique des processus de non-équilibre : une ontologie de la nature à partir de la physique, chez Ilya Prigogine* (mémoire), 2020, inédit, 2020,*Op.Cit*, p.27-28

l'univers ne remplit pas ces conditions. Il n'est, certes pas, en contact avec une autre entité que lui-même, mais son volume n'est pas constant. Donc, ses variables thermodynamiques d'état intensives et extensives ne sont pas stationnaires comme elles devraient l'être, en principe malgré le fait qu'il n'existe pas un environnement extérieur avec lequel il effectuerait des échanges qui justifieraient les variations observées. Cela nous a amené à dire que l'univers, s'il faut dire qu'il constitue un système thermodynamique isolé, est un système thermodynamique isolé atypique. Pour aboutir à ces catégorisations, il a fallu adopter une démarche inductive faite à partir des systèmes thermodynamiques que l'homme a l'habitude de manipuler à son échelle. Cela dit, si l'induction est une méthode reconnue en science, ses risques sont aussi accrus. Mais la science ne peut se passer d'elle car la testabilité universelle est une chimère. On a donc beau relever ses limites elle demeure une méthode privilégiée. Cependant, son abus pourrait conduire l'homme à des erreurs grave d'appréciations. Le pire est de céder, en plus de cela, à une sorte d'induction amplifiante qui consisterait, elle, à exagérer sur les conclusions de telle enseigne que l'on puisse dire que l'univers se comporte comme ceci ou comme cela parce que nous l'avons observé dans une de ses parties. Or, l'exemple de l'ensemble grand canonique nous a fait comprendre qu'un état local pourrait se dissoudre dans le grand ensemble sans altérer ses principes. L'induction amplifiante à partir d'une observation peut donc être une grosse pétition de principes.

De plus, ce que nous appelons en thermodynamique *univers* dans le cadre local n'est, en fait, que l'environnement extérieur à la température 15º C. Alors que la température de l'univers en tant qu'univers est de -270 º C, légèrement au-dessus du zéro absolu. Ce qui est aux antipodes de ce que nous nommons univers de façon locale. Ainsi, nous pouvons retenir deux choses à ce niveau :

Premièrement, l'environnement immédiat n'est pas l'univers. C'est un abus de langage que le milieu extérieur soit parfois appelé univers. Or, en thermodynamique, nombre de documents appellent tantôt l'environnement extérieur associé au système étudié *univers. C'est ce que nous pouvons lire dans les colonnes d'un document de thermodynamique sous la plume de BELAID Taous de l'université de A. MIRA-BEJAIA qui dit : « l'ensemble système + extérieur constitue l'univers. »*[198] *C'est qu'illustre la figure ci-dessous.*

[198]BELAID Taous, *Cours et exercices de thermodynamique,* Université de A. MIRA-BEJAIA, Faculté de technologie, Département de technologie, année universitaire 2019-2020, in https://elearning.univ-bejaia.dz, p. 9.

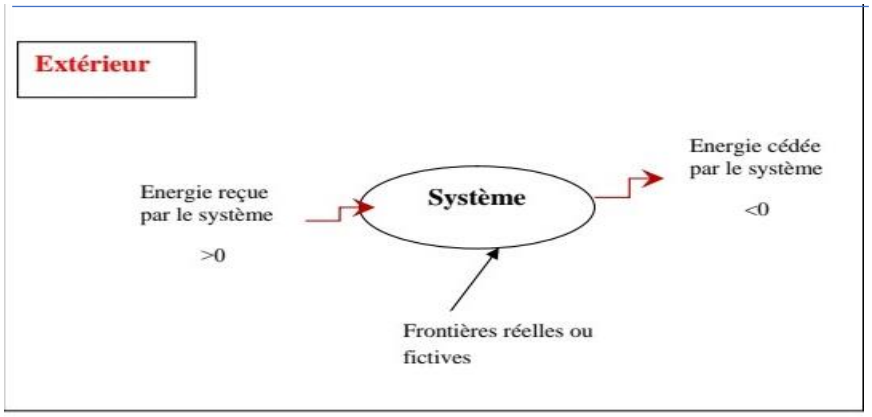


Figure 13 : Illustration de la conception de notion d'univers comme union du système et de son environnement proche (tirée de BELAID Taous, in Cours et exercices de thermodynamique)

Dans ce sens le concept d'*univers* ne correspond guère à l'environnement extérieur infini ou à l'ensemble de tout ce qui existe dont nous étudions l'entropie dans ce travail. Il correspond à l'environnement extérieur proche du système. C'est que nous pouvons dans un article produit par Maxime Nagels, Abdelkader Anakkar, Abdelhalim Guelzim qui affirment ceci : « *« au sens thermodynamique du terme, la notion d'univers fait référence non pas à un système infini mais à un milieu fini fait de la réunion du système et de son environnement proche appelé milieu extérieur. Ce dernier ne peut alors réaliser des échanges qu'avec le milieu thermodynamique considéré. Ainsi l'union (système et milieu extérieur) pourrait donc être considérée comme un ensemble globalement isolé, que l'on nommerait univers. »* [199]Ce problème de confusion linguistique a entraîné des conséquences graves sur le fait d'amener les apprenants à considérer la température extérieure au système étudié comme étant la température l'univers. Cela est, bien sûr, une erreur. Ainsi, quand on est sur la terre, la température de l'univers est de 15 degrés Celsius ; ce qui correspond à la température moyenne de l'atmosphère terrestre. Ainsi, dans un exercice donné sur un blog d'internautes, les apprenants étaient confus sur la notion d'univers. Certains voulant calculer la température de l'univers entier, tandis les autres se confinaient au système et à son environnement proche. Or, l'univers en tant que tel a une température bien connue, proche du zéro absolu.

[199]Maxime Nagels, Abdelkader Anakkar, Abdelhalim Guelzim, *Le concept de système thermodynamique*, Université de Lilles, Faculté des sciences et technologie, Département de physique,CETSIS 2021 – Colloque de l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes in https://www.j3ea.org,

Deuxièmement, on ne saurait rien dire de l'univers à partir des cas isolés. Sinon, ce serait une induction amplifiante. Nous avons dit que l'univers en lui-même échappe à tout ce que l'on peut dire et observer à propos des systèmes thermodynamiques. Maxime Nagels, Abdelkader Anakkar, Abdelhalim Guelzim poursuivent en affirmant que

> Cette remarque fait écho à la notion d'Univers développée en 1865 par Clausius qui énonçait : "L'Energie de l'Univers est constante, l'entropie de l'Univers tend vers un Maximum." Ainsi, on peut se demander si l'Univers de Clausius, constitue un système thermodynamique dans lequel les principes sont applicables. Cet univers est-il considéré comme un milieu fini ou infini ? La question semble délicate, puisqu'en l'état actuel de nos connaissances, on ne peut affirmer que l'Univers n'est pas un système infini. Aussi, le concept d'énergie totale et le principe de conservation qui est associée n'ont finalement peut-être aucun sens dans le cas de systèmes infinis.[200]

Ce qui est intéressant dans cette précédente affirmation est le fait que les auteurs se demandent si l'Univers constitue un système dont les principes, entendus comme principes élaborés à partir des systèmes locaux, sont applicables. Le super-système pourrait entrer dans une catégorie de systèmes ? Si oui, laquelle ? Si non, on ne peut rien inférer sur le système univers entier à partir des catégories qui constituent notre environnement immédiat.

Enfin de compte, la connaissance de l'universel ou la connaissance universelle qui consisterait à décrire les paramètres thermodynamiques, à l'échelle soi-disant globale, court bien le risque d'être empreinte d'erreurs méthodologiques. Car, comme nous l'avons dit préalablement, l'induction comporte très souvent une très grande marge d'erreur ou simplement une large marge d'incertitude en termes de réalisation, à plus forte raison quand on parle d'induction amplifiante.

5.1. 3. Thermodynamique universelle : entre une théorie incomplète, un errement de l'esprit ou une mégalomanie épistémique ?

L'incomplétude théorique fait partie d'un grand ensemble dans les sciences formelles de nature logico-mathématique, à savoir l'ensemble traitant de la question des indécidables. Les indécidabilités relèvent de la logique mathématique et se rapportent à des énoncés dont on ne peut rien déduire. L'indécidabilité est ainsi la négation même de la décidabilité ou de la déduction. Or, les sciences formelles ou sciences du raisonnement correct nous permettent de

[200]Maxime Nagels, Abdelkader Anakkar, Abdelhalim Guelzim, *Le concept de système thermodynamique,* CETSIS 2021 – Colloque de l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes, *Op.cit.*

raisonner correctement afin de mieux déduire. La théorie des indécidables fait partie du registre de la théorie des incomplétudes. Quelle est la pertinence d'un tel principe dans le processus de développement des savoirs ? Les indécidables posent un problème à savoir qu'il est des choses où le raisonnement correct ne suffit pas toujours pour décider. Quand on parle des indécidables, on pense surtout au grand mathématicien Kurt Gödel avec sa fameuse théorie des incomplétudes. Cette théorie énonce qu'une théorie est cohérente, mathématiquement parlant évidemment, que s'il existe des énoncés qui n'y sont pas démontrables. De ce fait, la théorie incomplète en mathématique établit qu'il existe des vérités qui ne sont ni démontrables ni réfutables. Cette théorie est basée sur deux principes dont le premier s'énonce comme suit : *« Dans n'importe quelle théorie récursivement axiomatisable, cohérente et capable de "formaliser l'arithmétique", on peut construire un énoncé arithmétique qui ne peut être ni démontré ni réfuté »*.[201]De pareils énoncés sont automatiquement indécidables. Le second principe, quant à lui, s'énonce comme il suit : *« Si T est une théorie récursivement axiomatisable qui permet de formaliser "suffisamment d'arithmétique et si T prouve un énoncé exprimant qu'elle est cohérente, alors T est contradictoire. »*[202] Cela signifie qu'une théorie T, cohérente ne peut prouver sa propre cohérence. En un mot, l'incomplétude signifie qu'une théorie ne peut pas rendre compte par elle-même des vérités qu'elle contient. Pour cela, il faut aller chercher ailleurs les arguments pour démontrer ses vérités pour que la théorie soit complète.

Gödel, dans le premier principe, parle des mathématiques et des systèmes apparentés. Parmi ces systèmes apparentés, on peut citer la physique. Beaucoup de théories physiques sont incomplètes. C'est le cas de la mécanique quantique où, dans les relations d'incertitude d'Heisenberg, le physicien ne peut plus, à partir d'une paire d'observables donnée non commutative (soit la vitesse et la position), voir évoluer les deux observables simultanément. S'il connait la vitesse, il interprète les positions et vice versa. Mais, il ne saurait les connaître simultanément, il ne peut alors que les interpréter. L'interprétation, un principe qui ne relève pas pourtant de son domaine, a glissé en physique dès lors. Appliqué à la mécanique quantique, on a donné à cette interprétation le nom de *l'interprétation de Copenhague* par référence à la ville danoise qui a abrité fameuse école qui a vu se succéder les grands fleurons de la physique quantique. Le fait que la physique ne puisse pas rendre compte par elle-même de ses propres

[201] Kurt Gödel, *Sur les propositions formellement indécidables des Principia mathematica et des systèmes apparentés*, consulté dans https://fr.wikipedia.org/
[202] *Idem*

vérités, pour aller chercher en philosophie ou dans la science-fiction et autres, rend la théorie incomplète. Pierre Sagaut, philosophe des sciences nous édifie à ce sujet quand il affirme :

> Cela signifie que toutes les propositions vraies de telles théories (y compris l'arithmétique) ne peuvent pas être démontrées dans un seul et unique système formel donné : outre les propositions que l'on peut démontrer comme étant vraies ou fausses, il existe des propositions indécidables sur lesquelles on ne peut pas statuer. Il est important de retenir que l'indécidabilité n'est pas liée à la difficulté de la démonstration, mais au fait que cette démonstration est impossible avec la théorie.[203]

Parlant de l'univers, il existe certaines mesures, certains calculs voire certaines propositions que l'on ne peut pas déduire ni démontrer. C'est pourquoi, il n'est pas rare de voir la physique passer à la limite de la philosophie voire de la science-fiction. Parlant de l'univers, Ilya Prigogine se plaît à citer les *cosmicomiques* d'Italo Calvino[204] qui ambitionne de relater l'origine avec un langage scientifique réconciliant cosmogonie drolatique, littérature, science et mythe. Et, nous voilà embarqués dans la pseudoscience. L'incomplétude théorique fait de telle sorte que la physique soit souvent obligée, bon gré mal gré, de sortir de son champ pour se risquer à des conjectures qui entrent dans l'ordre de la philosophie, de la théologie, de la fiction, de la littérature pure. On se trouve donc dans une sorte de c*osmicomiques.* Cela signifie qu'à un moment, la physique ne saurait se suffire à elle-même pour parler de son propre domaine. Du moins, si elle le fait, il est des choses sur lesquelles elle ne peut pas trancher. Revenant sur la question sur la l'entropie générale, il faut la rapporter à la question sur les systèmes thermodynamiques. Car, on ne saurait calculer une entropie sans avoir toutes les données : types de systèmes, les variables extensives et intensives etc. Or, nous sommes incapables de connaître le type de système que constitue l'univers. Les débats sont houleux et bien étoffés en faveur de tel ou tel autre système. Mais, il n'existe pas une norme de référence en la matière, permettant de trancher ou de décider. Nous nous retrouvons donc dans une autre sorte d'indécidabilité quant à certaines réalités et certaines mesures. Le type de système auquel correspond l'univers est bien de ce registre : le registre des indécidables. Voilà pourquoi chacun y va de son propre ressenti et élabore sa propre théorie avec des arguments bien étoffés. Dans ce cas, on pourrait se demander si tout cela ne s'assimile pas à un errement de l'esprit humain enclin à une sorte de mégalomanie épistémique ?

---

[203] Pierre Sagaut, *Introduction à la pensée scientifique moderne,* Institut Jean Le Rond d'Alembert, Université Pierre et Marie Curie – Paris 6, pierre.sagaut@upmc.frhttp://www.lmm.jussieu.fr/~sagaut, p. 100.

[204]*Les cosmicomiques* est le terme français de la Traduction du roman Italo Calvino intitulé en anglais *Cosmicomics*. C'est un célèbre récit décrivant l'origine de l'univers. L'écrivain se veut scientifique par l'intervention de conférenciers faisant office de célèbres physiciens de l'histoire des sciences, mais la suite prend souvent une coloration fantastique avec des histoires drolatiques où se mêlent science, littérature et fiction.

Dans le deuxième moment de notre réflexion, il nous revient à nous demander si l'entropie générale ne correspondrait pas à un errement d'esprit. L'errement d'esprit ici est une attitude de divagation qui survient quand l'esprit ne trouve pas ses repères. Dans le cas de l'entropie, une telle attitude est-elle envisageable ?

Il n'est pas rare que, dans certaines questions en science, en philosophie ou en tout autre domaine, on puisse noter des cas d'errement d'esprit. Le philosophe allemand Emmanuel Kant avait établi le cadre de cet errement de l'esprit dans la quête du savoir. Dans la *Critique de la raison pure*, Kant traite de la question de l'extension de la raison humaine en rapport avec les limites de la possibilité de connaissance. Il répond notamment à la question : que puis-je savoir ? Le problème épistémologique étant de savoir si nos idées correspondent à quelque chose de réel ou sont-elles fictives ? Le monde extérieur est-il comme nous le pensons ? En fin, nos théories sont-elles vraies ? Ces questions pourraient bien s'appliquer à notre réflexion. On pourrait bien se demander si les réflexions cosmologiques touchant à certains domaines sont vraies ? si elles sont même réelles et si les théories construites autour de ces réflexions sont-elles mêmes vraies ?

Chez Emmanuel Kant, il existe une différence entre les formes a priori de l'entendement et les formes a posteriori. Les formes a priori sont toujours présentes. Elles ne sont pas acquises par l'expérience. Bien plus, elles sont connaturelles à notre entendement. Pour connaître, contrairement à Hume qui établit que toute connaissance passe par les sens, Kant établit deux sources de connaissances à savoir la sensibilité d'une part et l'entendement d'autre part. L'expérience seule ne suffit donc pas, encore moins l'entendement tout seul. Mais les deux doivent se joindre pour que la connaissance soit possible. Par ailleurs Emmanuel, établit en dernier lieu les mécanismes qui produisent des erreurs et illusions. Kant s'intéresse au fonctionnement illégitime de l'entendement. La dialectique transcendantale de Kant étudie les erreurs de la raison en tant que celle-ci sort des limites de l'expérience. La raison se livre alors à des paralogismes, des antinomies et l'Idéal de la raison pure. Cette précision nous permet de comprendre ce que nous appelons ici errement de l'esprit. Ce n'est pas de la pure spéculation, de la fiction pure, ou de la simple fantaisie, mais c'est l'aventure de la raison au-delà de l'horizon des connaissances. Chez Emmanuel Kant, cet horizon est l'expérience sensible. A ce niveau, les théories se mêlent, se contredisent sans qu'un arbitrage judicieux puisse trancher. Les antinomies de la raison pure se produisent lorsque la raison tombe dans des conflits insolubles et ne parvient

pas à se déterminer en faveur d'une des deux ou trois thèses possibles opposées. La raison erre alors ici et là et finit par glisser dans des contradictions à n'en pas finir.

Bien que nous soyons dans une théorie physique qui fait appel aux données empiriques, cette épistémologie kantienne peut nous aider à comprendre les impasses de notre étude. De fait, selon ce qui précède, la raison ne peut embrasser, de façon analytique, les formes des objets sensibles qui lui sont hors de portée. Ainsi, ces objets deviennent, eux aussi, comme des réalités supra-phénoménales. Car, les objets de l'expérience sensible, possiblement connaissables par l'entendement, se donnent souvent sous forme de phénomènes par opposition aux noumènes définis comme l'objet en soi, dégagé de tous les attributs et qualités possibles. Mais, il se peut que la physique astronomique nous offre un spectacle des objets physiques qui se situent hors de l'expérience. Cela dit, tous les objets qui se trouvent au-delà de l'horizon des connaissances sont de ces objets qui, malgré leur nature physique, ne se livreront jamais à l'expérience sensible.

Ainsi, tous les phénomènes de la borne inférieure de l'univers, à savoir ceux qui se seraient déroulés avant le big bang et tous les phénomènes de la borne supérieure, à savoir tous les objets qui se trouvent à 15 milliards d'années lumières, selon le modèle standard de la physique, sont inconnaissables. Bien plus, l'univers comme l'ensemble de tout ce qui existe, reste, à cet effet une énigme, un mystère. Est-il un système fermé, un système ouvert ou un système isolé ? L'esprit se saurait trancher, sinon arbitrairement sans norme de référence faisant autorité en la matière. Nous sommes résolument en face d'une indécidabilité théorique. On aurait bien raisonné que la logique ne nous permettrait pas de déduire.

5.2. Mesures et démesures

5.2.1. Les difficultés d'accès aux données initiales : et le problème de l'infranchissable *mur de Planck* et *l'amplitude de probabilité* des valeurs entropiques initiales

Nous savons, par définition, que l'entropie est une notion qui a trait à une fonction d'état. La fonction d'état est celle qui ne prend en compte, dans les calculs, que l'état initial et l'état final. Éric Brunet, Thierry Hocquet, Xavier Leyronas nous rappellent que *« la valeur de S dépend seulement de l'état (macroscopique) du système, et non pas de son histoire. »*[205]Cela dit, l'entropie, comme fonction d'état, a besoin qu'un état initial soit défini préalablement ; ensuite

[205]Éric Brunet, Thierry Hocquet , Xavier Leyronas, *Cours de thermodynamique*, Sorbonne, *Op.Cit.*, p.26

que soit défini un état final. Le chemin suivi importe peu. La différence entre les deux états (initial et final) donnera l'entropie du système. On pourra alors dire si l'entropie a augmenté au cours du temps ou si elle a diminué. Essayons d'appliquer cela à l'univers pour pouvoir calculer son entropie générale en commençant par l'état initial, c'est-à-dire le moment de déclenchement de sa course d'expansion. Là, on est face à un problème. Les données ne sont pas accessibles car il n'est pas évident de définir l'état initial de l'entropie pour pouvoir faire un bilan.

La raison pour laquelle, il serait nécessaire de rentrer aux états initiaux et finaux est simple : si on se contentait de commencer à n'importe quel moment *t1* choisi arbitrairement pour s'arrêter à n'importe quel autre moment *t2* choisi tout aussi arbitrairement, on risquerait d'avoir affaire, à ce moment-là, au calcul d'une entropie locale ayant régné à un moment de l'histoire et à une région précise de l'univers. On ne serait pas en train de calculer une entropie générale mais plutôt une entropie locale d'un système thermodynamique aux paramètres et catégories usuelles, bien défini dans l'espace et le temps et limité par des frontières. Ce qui n'est pas l'objet de la présente articulation de notre réflexion. Pour parler de l'entropie universelle, il faudrait donc poser le problème d'un état initial et d'un état final.

Parlant de l'état initial, les débats houleux. On se pose la question de savoir ce que serait l'entropie à l'instant avant l'explosion du big bang ? En d'autres termes, on se demande ce que serait l'entropie de l'atome originelle qui a donné naissance au big bang ? A ce niveau, on n'en sait rien. En effet, la grande théorie qui a permis de rebrousser le temps jusqu'à l'ère de Planck (10^{-43}s avant le big bang) à l'échelle de Planck, à savoir la théorie de la relativité d'Einstein ne peut plus rien nous dire. Cet instant représente ce que les astrophysiciens nomment le mur de Planck. C'est un mur et une barrière inexpugnable où viennent échouer les efforts de tous les physiciens et savants de tous bords. Lisons ce que nous dit cet article de Yann Verdo publié dans Les Echos :

> Beaucoup de physiciens ont acquis la conviction que l'espace-temps n'est uni et lisse qu'en apparence, qu'à un niveau infiniment plus fin de détails, sa structure se révèle discontinue, chaotique et en proie aux fluctuations. Cette limite en dehors de laquelle la géométrie usuelle cesse d'être valable, ils la fixent à 10^{-35}mètre. C'est petit mais ce n'est pas rien. D'après leurs calculs, l'univers primordial a atteint cette taille de 10^{-35} mètre 10^{-43}seconde après le big bang. Cette phase, c'est l'ère de Planck.[206]

[206]Yann Verdo, Que 'est-il produit à l'instant zéro ? in https://www. lesechos.fr/2013/08, publié le 05 aout 2013 mis à jour le 06 2019

Nous apprenons, de ce chercheur, qu'au-delà de ce mur de Planck, aucune connaissance certaine n'est plus possible partant de la théorie de la relativité générale d'Einstein qui est la théorie la plus explicative de l'univers. Et comme le précise l'auteur de la citation, le mur de Planck est l'aporie où viennent échouer les efforts acharnés des plus grands esprits. Pour certains physiciens et astrophysiciens, c'est l'horizon des évènements de la borne inférieure. Après quoi tout n'est plus que conjectures, suppositions et probabilités. En effet, l'instant avant l'ère de Planck est proche de ce qu'un chanoine anonyme rapporté par le psychologue américain Tom Stonier avait appelé le *nuage de l'inconscience*[207]. C'est une situation d'isotropie et de symétrie égales qu'il situe à l'origine du monde physique où on ne pouvait encore rien distinguer avant que se déchire comme un rideau l'équilibre initial engendrant l'entropie. Reprenons cette citation :

> Si vous vous imaginez dans un nuage uniforme d'une taille infinie, vous vous rendriez compte que vous êtes désespérément perdu ; partout où vous regarderiez, vous ne verriez que le même champ uniforme de brume sans aucune forme pour vous informer de l'endroit où vous êtes, pas même de repérage entre le haut et le bas. Les mathématiciens et les physiciens appellent cette homogénéité totale un état de symétrie ; tout est identique- symétrie dans toutes les directions. Rien ne peut exister dans un univers de symétrie complète ou uniformément identique[208].

Cette image *du nuage de l'inconscience* traduirait la situation dans laquelle la conscience se trouverait au-delà de l'horizon des événements : tout est tout et rien n'est rien. Les paramètres thermodynamiques de l'instant zéro associé à la relativité générale semblent donner des résultats insolites et souvent discutables.

En effet, la gravitation de Newton et la courbure de l'espace-temps d'Einstein ne fonctionnent plus. Il faut leur trouver des analogues microscopiques. Or, à l'état actuel de nos connaissances, la physique n'a pas encore trouvé ces analogues microscopiques pouvant scientifiquement parler avec autorité de l'état des variables thermodynamiques au moment où eut lieu le big bang. Ces analogues n'existent pas encore, car la théorie de la relativité et la théorie de la gravitation universelle ne fonctionnent pas à l'échelle microscopique. Ce sont des théories qui expliquent le comportement des objets macroscopiques. Yann Verbo poursuit en disant :

> Si l'on rembobine assez longtemps le fil de l'expansion, on en arrive forcément à un instant – l'instant zéro – où toutes les longueurs cosmiques ont une valeur nulle. A cet instant, tout le contenu actuel de l'univers se concentre dans un volume infiniment petit. Conséquence

[207] Cf Chapitre 1, sous-chapitre 1, numéro 3.

[208]Stonier, T., *Information and the Internal Structure of the Universe*.New York: Springer-Verlag, 1990, *Op.Cit* ., p.70-72

> immédiate : la densité et la température de cet univers primordial sont, elles aussi, de valeur infinie. Le big bang n'est pas autre chose que cette petite tête d'épingle infiniment petite, dense et chaude. (…) Mais tous ces infinis qui apparaissent dans ses équations ne sont pas moins problématiques. C'est généralement le signe que la théorie explicative – en l'occurrence, la relativité générale- sort de son domaine de validité.[209]

Au sujet de la gravitation, on sait que plus la densité est forte plus la force gravitationnelle est importante, car la densité est un rapport de la masse volume sur la masse volume de référence du corps, soit d= $\frac{\rho}{\rho o}$ où d est la densité du corps en kg, ρ est la masse volumique du corps en kg.m-^{3} et ρo la masse volumique du corps de référence en kg.m^{-3}. Or, on sait que la masse volumique est un rapport de la masse sur le volume soit, ρ=$\frac{m}{v}$ où m est la masse et v le volume. La densité est donc en relation avec la masse qui participe en grande partie dans l'équation de la gravitation universelle de Newton F= $G\frac{m1m2}{d2}$. Or, si la gravitation devenait infinie, la masse volumique le serait également. De là, on peut déduire que plus la force gravitationnelle est forte, la masse volumique est grande et plus la densité l'est également.

Revenant un tant soit peu sur les variables thermodynamiques, on se demande ce qu'il adviendrait alors de la température ? Dès lors la température augmenterait aussi de façon infinie selon la 2e loi des gaz parfaits dite loi Gay-Lussac, à savoir : *à pression constante, le volume est inversement proportionnel à la température.* Cette loi des gaz parfaits qui s'énonce PV =nRT peut encore s'écrire P=$^{nRT}/_{V}$. Cela dit, si le volume diminue de façon infinie, la température croit inversement de façon infinie. Donc, la force gravitationnelle travaillant, la densité augmentant, la température, augmenterait nécessairement. Et puisque les autres paramètres ont des valeurs infinies, la température elle aussi atteindrait ces mêmes proportions infinies. Il en ait de même de la pression facilement déductible de la température et du volume. Le volume étant infiniment petit, la pression serait inversement proportionnelle au volume, et elle atteindrait aussi des proportions infinies, soit P=$^{nRT}/_{V}$. A ce niveau, nous relevions déjà quelques incongruités ; à savoir :

- Non seulement la relativité générale engendre des incongruités, avec des valeurs géométriques infinies comme la courbure de l'espace-temps qui devient infinie ou comme

[209]Yann Verdo, *Que s'est-il produit à l'instant zéro* ?in https://www. lesechos.fr/2013/08,Op.cit.

les longueurs spatiales qui viennent nulles, mais aussi les variables thermodynamiques donnent des valeurs infinies (densité, volume, température, pression.)

- On ne sait vraiment rien de l'entropie qui peut régner dans un tel environnement. Trois hypothèses sont envisageables à ce niveau.
    1. Certains affirment que big bang aurait eu une entropie nulle suivant le troisième principe de thermodynamique en conformité avec la loi de Boltzmann S=Kb.lnW très proche de celle de Max PlanckS= logW. Kb+S_0 (0K). Pour eux, l'instant zéro étant réduit à un état atomique (c'est ce que pensait le chanoine George Lemaître, pionnier de la théorie du big bang, qui la dénomma d'abord la théorie de l'atome primitif), tout cet ensemble ne formerait qu'une seule et même configuration. Et les calculs donneraient toujours un résultat nul pour l'entropie. L'entropie du big bang serait donc nul bien que la température fût infinie.
    2. A l'inverse, d'autres pensent que l'entropie du point initial du big bang fut tout simplement minimale, mais pas nulle. Car, des fluctuations auraient régné au sein du big bang rendant le système instable. C'est pourquoi Yann Verdo affirmait tantôt que l'espace-temps n'est jamais lisse. Il n'est lisse qu'en apparence. Mais, lorsque qu'on s'y approche de très près avec des mesures accrues, celui-ci est chaotique et instable. Rappelons cette citation de Yann Verdo : *« Beaucoup de physiciens ont acquis la conviction que l'espace-temps n'est uni et lisse qu'en apparence, qu'à un niveau infiniment plus fin de détails, sa structure se révèle discontinue, chaotique et en proie aux fluctuations. »*[210]Les fluctuations du vide quantique auraient donc régné au sein de la configuration initiale telle que son entropie ne fut pas nulle mais très minimale. Pour s'en convaincre, visualisons un schéma de l'évolution entropique proposée par Tom Stonier.

[210]Yann Verdo, *Que s'est-il produit à l'instant zéro* ?in https://www. lesechos.fr/2013/08, *Op.cit.*

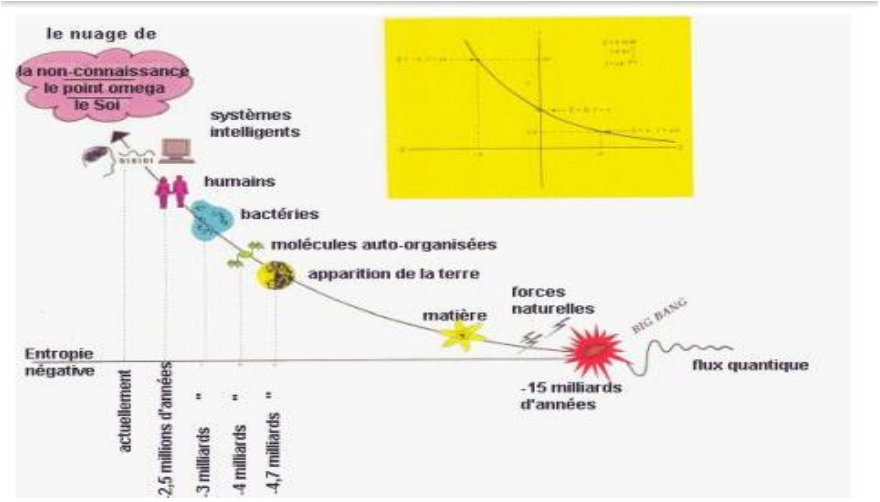


Figure 14 :Illustration de l'évolution de l'univers où la décroissance entropique est opposée à l'augmentation du flux d'information (tiré du modèle mathématique de Tom Stonier

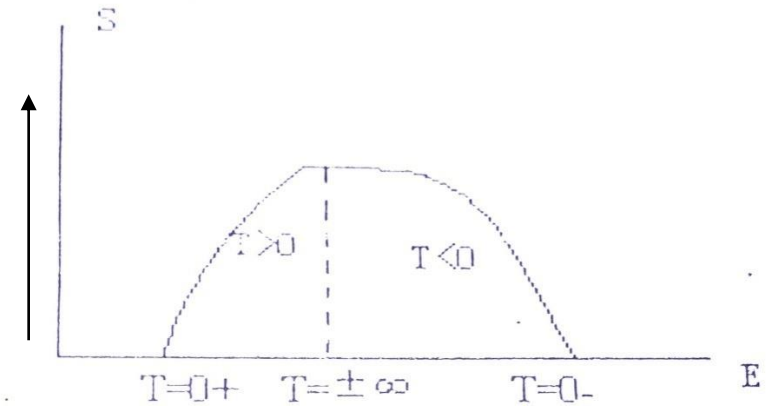
Ici, l'entropie n'était pas nulle mais très minimale. Car, la courbe de Tom Stonier est précédée par les fluctuations du vide quantique. L'espace-temps était donc instable et chaotique. Il y a donc plusieurs thèses qui s'affrontent sans possibilité d'un arbitrage objectif, par manque de référence arbitrale.

3. Et rien n'empêche même, par ailleurs, que l'on puisse dire que cette entropie fut maximale, tant il est vrai que les paramètres thermodynamiques étaient à l'équilibre.

$$\Delta S \Rightarrow \lim_{T \to +\infty} \left(\frac{\partial Q}{\partial T} \right)_T = 0^+$$

Si on dérive la température à l'infini, on se retrouve effectivement, selon les calculs de la dérivée partielle, à une fonction entropique dont la solution est zéro positif. C'est ce que nous dit Yi-Fang Chang dans son étude sur l'entropie des systèmes isolés : *« At $T=\infty$, the energy is $\bar{E}_n$ and the entropy reaches its maximum value Nlng, These values correpond to a distribution with equal probability over all quantum states of the system which is the limit of Gibbs distribution as $T \to \infty$ »*[211]

[211]Yi Fang Chang, *Entropy decrease in isolated systems: theory, facts and test, in International Journals of Fundamental Physical Science (IJFPS) Vol 10, N^0 2,Op. Cit.* p. 17.



Figfure 15: Courbe du comportement de l'entropie par rapport à la dérivatiion de la température tirée de l'article Yi-Fang Chang intitulé entropy decrease in isolated systems : Theory, Facts and tests.

Nous pouvons visualiser que, plus on augmente la température, plus l'entropie augmente de façon monotone. Ainsi, si on fait tendre la température vers l'infini, l'entropie atteindra son seuil maximal. A partir de ce seuil, elle ne variera plus comme sur la figure ci-dessus. De même, si on faisait décroitre la température, l'entropie décroitrait de facon monotone. Mais, comme la température ne peut pas décroître à l'infini, on s'arrêterait théoriquement à $T=0^-$ qui donnerait une entropie nulle de 0Kelvin. La situation est bien sûr idéale, car c'est une température inatteignable. Tout ceci démontre que l'entropie de l'atome primittif aurait pu bien être nulle si les varibles thermodynamiques étaient tous à leurs maximum et donc à l'équilibre, c'est-à-dire que l'entropie aurait valu zéro (S=0).

Donc, il est difficile, de ce point de vue d'établir de façon apodictique une valeur mathématique de l'entropie initiale de l'univers. Était-elle nulle, minimale ou alors maximale ? Nous sommes donc en face d'une indétermination. L'indétermination est une situation habituelle que l'on trouve dans la théorie quantique. Elle peut concerner la dualité onde-corpuscule ou encore les pairs d'observables non-commutatifs (vitesse- position). Le principe d'indétermination d'Heinsenberg stipule qu'en physique quantique, il y a une intrication de la relation onde-corpuscule de telle enseigne que les deux états sont superposés. Il en est de même des pairs d'observables non commutatifs (vitesse et position) dont l'un est voilé par l'autre. L'amplitude probabilité est une fonction mathématique qui exprime l'équiprobabilité que les deux évènements ont lieu. Mathématiquement, cela est possible, car l'amplitude de probabilité notée ρ exprime non pas les réalités en elles-mêmes mais les potentialités de cet événement. La parabole du *chat de*

Schrödinger[212] est encore plus illustrative. Elle nous permet de comprendre que la fonction ne nous décrit qu'une amplitude de probabilité qui est encore plus virtuelle que la probabilité elle-même. L'amplitude de probabilité ρ est une superposition des états quantiques telle que le carré de son module/ψ/^{2} donne la probabilité pour que le système soit mesuré dans un état donné ψ ou ψ*. C'est une superposition mathématique de deux états réels tel que : soit ψl'évènement, ψ est donné avec son complexe conjugué ψ*, et sa densité de probabilité est l'ordre de /ψ/^{2} équivalant à ψψ* représentant une superposition des états quantiques. Ces états mathématiques sont seulement des potentialités avant leur mesure par le sujet. L'indétermination est donc la difficulté à passer de ces potentialités mathématiques (onde-corpuscule) aux réalités que nous mesurons. L'indétermination quantique est donc plutôt due à une situation mathématique (et non réelle) appelée *amplitude de probabilité*. Ce développement voudrait simplement signifier que les modèles esquissés sur l'entropie initiale rentrent dans l'ordre de la probabilité. De ce fait, ils sont tous équiprobables, c'est-à-dire qu'elles ont la même chance de se réaliser. Elles constituent à cet effet, une amplitude de probabilités, à savoir des potentialités qui ne seront jamais peut-être vérifiées. Car, la théorie quantique qui constitue la porte d'accès la plus crédible quant à la question du big bang demeure, par nature une théorie probabiliste. Tout dépendra donc de notre approche du big bang pour que nous puissions estimer l'entropie initiale à telle ou telle valeur (nulle, minimale ou maximale).

La réponse sera toujours discutable, car nous ne pourrons jamais passer des probabilités aux réalités, avec un événement enfoui dans le passé. Par conséquent, il est objectivement difficile de dire si elle a évolué ou non au cours du temps lorsqu'on ignore ces valeurs initiales.

5.2.2. Expansion de l'univers : les problèmes de mesures d'un état entropique final

Le traitement de l'état initial de l'univers fait nécessairement appel à l'état final. Car, l'entropie étant une fonction d'état, sa courbe évolutive implique la connaissance des deux états (initial et final). Après s'être penché sur l'état initial qui nous a donné du vertige puisqu'il fallait franchir le mur de Planck qui constitue la métaphore de l'horizon des connaissances à l'état

[212] La métaphore du chat de Schrödinger est une métaphore qui constitue un des paradoxes les plus célèbres de la mécanique quantique. Elle illustre une situation complexe d'un chat enfermé dans une cage noire susceptible d'être mort s'il actionné le mécanisme mortel qui s'y trouve. Il est aussi susceptible d'être vivant s'il ne l'a pas actionné. Avant d'ouvrir la boîte pour savoir ce qu'il en est, le chat vivat et mort théoriquement.

actuel de la science, à plus forte raison, il s'est avéré que les théories qui nous permettent de décrire les objets macroscopiques de l'univers se sont montrées non fonctionnelles. Mais qu'à cela ne tienne, d'autres théories moins certaines par leurs natures probabilistes nous sont venues en aide. A l'issue, les données recueillies restent tout aussi de l'ordre du probable que les théories qui les expliquent. C'est pourquoi nous avons parlé d'amplitude de probabilité parlant des modèles entropiques possibles du big bang. Tous ces modèles sont valables, tout dépend de l'approche privilégiée. La définition d'une entropie initiale demeure, de ce fait, une nébuleuse bien que nous ayons quand même privilégié l'approche d'entropie maximale, en raison du fait que les variables auraient pu tendre vers l'infini, et donc vers l'équilibre thermodynamique. Il reste maintenant à tabler sur l'état final.

Nous avons souligné l'importance d'avoir ces états initiaux et finaux. Car ils constituent le fondement de la réflexion. Si nous les enjambons, nous risquerions de faire banqueroute en calculant, non pas l'entropie de l'univers mais celle d'une région de l'univers ou à un moment précis (un moment *t1* et un moment *t2*) dans l'histoire de l'univers. Ainsi, presque tous les modèles voudraient partir du big bang et suivre la courbe évolutive de l'entropie. Mais, il se trouve que l'état final soit une question aussi complexe que l'état initial. Et pour cause, cet état final n'est pas envisageable ni du point de vue de la pensée théorique ni du point de vue des calculs physiques.

La position du problème est simple : les pionniers de la thermodynamique nous ont légué l'héritage d'un univers considéré comme un système isolé. Et le modèle standard de la cosmologie adhère à cette conception thermodynamique de l'univers. Car, on n'envisage pas la thèse d'un autre univers à côté du notre capable d'échanger avec de la chaleur, de l'énergie et du travail. L'univers envisagé comme l'ensemble de tout ce qui existe n'aurait pas d'extérieur sinon cet extérieur-là serait encore l'univers. Donc, il est un système isolé ; le plus isolé de tous les systèmes isolés que l'on puisse imaginer. Rappelons, un tant soit peu, les propriétés de tels systèmes. Un système isolé est un système aux frontières adiabatiques, c'est-dire qui ne permet ni échange de chaleur, ni de matière avec l'extérieur. Dans un tel système l'entropie est toujours croissante jusqu'à l'atteinte du seuil d'entropie maximale ($s \geq 0$). C'est dans ce contexte que fut énoncé le second principe de thermodynamique en rapport avec la croissance exclusive de l'entropie. Mais seulement, l'univers, bien qu'offrant l'avantage d'être le système isolé parfait est

entaché de quelques irrégularités qui déjouent les attentes et compliquent les calculs. De ce fait, du point de vue méthodologique, on ne peut plus se plier à la règle qui consiste simplement à mesurer l'état initial et final pour ressortir le sens de l'évolution de l'entropie d'un système isolé. Le problème qui se pose est celui des frontières. Le système isolé doit en plus des propriétés sus-évoquées, présenter des parois indéformables. En un mot, c'est un système adiabatique aux parois indéformables. Ainsi, on peut lire dans Wikipédia ceci : *« un système isolé, par opposition à un système ouvert, est un système physique qui n'interagit pas avec ses environnements. On dit d'un système qu'il est isolé s'il n'échange ni matière, ni travail avec l'extérieur (paroi adiabatique et indéformable) »*[213] Le caractère indéformable des parois est un aspect très capital. Car, c'est cet aspect qui permet d'avoir un volume contrôlé et constant. Et nous sortons d'un régime stationnaire. Les variables de ce système sont instables dans le temps. Frédéric Doumenc explique que *« l'état d'un système est dit stationnaire si toutes les grandeurs qui le caractérisent demeurent constantes au cours du temps. Dans le cas contraire (une ou plusieurs variables d'état évoluent dans le temps), le système subit une transformation (ou évolution). »*[214] Ce qui n'est pas le cas pour le cas d'espèce. Le volume sera toujours inversement proportionnel à la température et à la pression alors que la température sera toujours proportionnelle à la pression, d'après les lois des gaz parfaits (1ère loi et 2e loi) qu'on peut résumer ainsi $PV=nRT$. Cela dit, La détente des parois causera toujours une diminution de la pression et celle de la température.

Cette précision sur le caractère indéformable des systèmes isolés est même l'un des aspects fondamentaux de ces systèmes, car c'est lui qui permet réellement que le deuxième principe qui milite en faveur de la croissance exclusive de l'entropie jusqu'au seuil maximal puisse s'appliquer. Car, si les parois sont déformables, le système ne pourra jamais atteindre l'état d'entropie maximale avec l'équilibre des variables. Le système pourra connaitre une augmentation d'entropie en un premier temps. Mais, au fur et à mesure que les parois se déformeront, le système aura tendance à se refroidir. De fil en aiguille, au cours d'un cycle très long, l'entropie de ce système connaîtra une diminution.

[213]Systèmes isolé in https:// fr.m.wikipedia.org

[214]Frédéric Doumenc, *éléments de thermodynamique et thermique, Thermodynamique I* , Université Pierre et Marie Curie, Licence de Mécanique - L2, Année 2008/2009,*Op.Cit.*, p. 9.

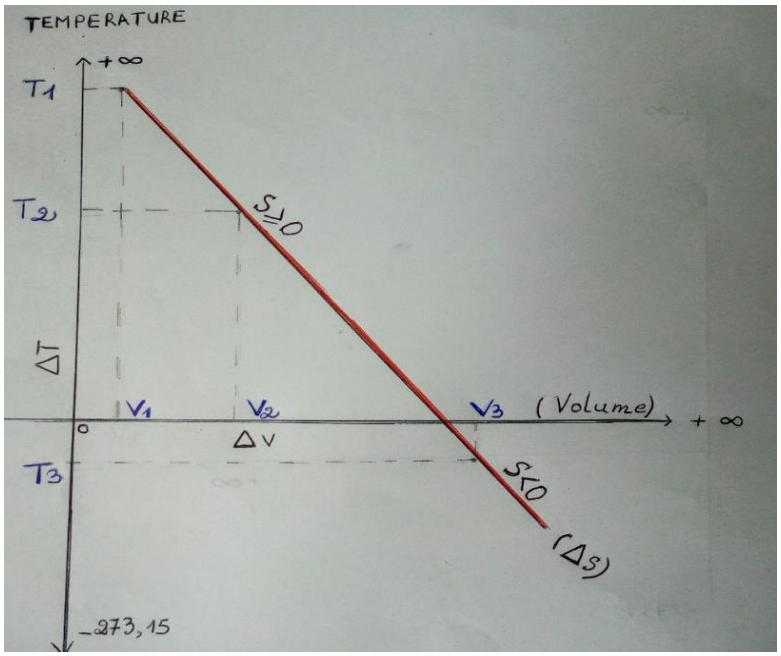


Figure 16 : illustration de la diminution de l'entropie due à la chute de température survenue avec l'augmentation du volume.

Dans la figure ci-dessus, on part d'une température suffisamment élevée dans un volume très réduit V1. Ensuite par déformation des parois, on tombe à une température T2 plus basse que la première dans un volumeV2 plus grand. Et au fur et à mesure que les parois se dilatent, on commence à tomber à des températures de plus en plus froides tendant vers le zéro absolu. Il est très probable que notre système univers soit un système isolé pareil connaissant la déformation de ses parois et ne permettant pas au deuxième principe de thermodynamique en faveur de la croissance exclusive de l'entropie de s'appliquer. Ces variations volumiques qui impliquent les variations thermiques donnent à l'entropie une courbe décroissante. L'expansion de l'univers, qui n'est pas une simple mobilité de son contenu comme agirait des particules libres souvent d'une énergie potentielle qui se dissout en énergie cinétique, est responsable de ce comportement. Il s'agit d'un étirement de l'espace-temps qui crée une distanciation entre les objets qui constituent le contenu de l'univers, et cela augmente de facto le volume de l'univers. Aujourd'hui ce volume est connu. Il est de $3/4\pi R^2$. Ce qui donne presque 10^{86}. Ce chiffre est sans cesse croissant. On peut le prévoir dans le temps sachant que la vitesse d'expansion est 67,3667Km /s/mégaparsec/[215].

[215] Cf chapitre 4 sous-chapitre 2, partie 1

Cela dit, l'expansion de l'univers nous sort des calculs classiques sur les systèmes isolés et engendre les problèmes de mesures spécifiques. Nous restons dans un système isolé du fait que l'univers ne communique avec un autre univers, mais néanmoins, sans pouvoir appliquer rigoureusement à l'univers,en tant que système, les lois et les principes qui régissent les systèmes isolés. Et cela est la résultante de l'entrée en en jeu de formes d'énergie inconnue et inattendues telle que l'énergie noire. Nous sommes habitués aux transformations d'énergie mécaniques en énergie thermiques pour les systèmes dissipatifs et à la conservation de l'énergie mécaniques pour les systèmes conservatifs tel que nous l'avons développé au chapitre 1.[216]Dans ce cas, le système isolé dissipe son énergie potentielle concentrée en un point initial en une énergie cinétique qui se dissout dans l'ensemble en faisant augmenter l'entropie jusqu'à son seuil maximal. Mais l'occurrence de l'énergie noire, une énergie *sui generis*, qu'on n'a pas prévu et dont personne ne connait ni la nature, ni les propriétés, repoussent les particules agissant comme un effet d'antigravité et perpétuant ainsi l'expansion de l'univers. Cela revient à dire que nous sommes-là en présence d'une singularité physique et thermodynamique qui déjoue les attentes et les calculs. Un volume sans cesse croissant pour une température cesse décroissante dans un système isolé, c'est le moins auquel on puisse s'attendre. Et ce moment, on ne comprend plus rien. Les calculs effectués sur cette base prévoient que l'entropie doit décroître. Mais face à un système isolé aux parois déformables ou sans parois, ou pire encore, un système isolé dont le volume augmente à chaque moment, l'entropie peut-elle encore croître ? En effet, selon la deuxième loi des gaz parfaits qui lie volume et température, on sait qu'au fur et à mesure que le volume augmentera, la température chutera tendant vers l'extremum en matière de températures, à savoir le zéro absolu. Sauf que dans ce cas, nous nous retrouvons en présence d'une situation à la limite du zéro absolu sans que les configurations totales tendent vers une configuration unique comme le prévoit le troisième principe[217]. L'expansion de l'univers apparaît ainsi comme un trouble-fête qui empêche non seulement d'appliquer le second principe de thermodynamique, mais qui change le sens du troisième principe où (W) le nombre de configuration n'est plus égal à 1 dans la formule S= Kb.log (W), alors que l'entropie est proche du zéro absolu. Dès lors, on se pose une nouvelle question : l'entropie de l'univers croit-elle ? Et si oui, pourquoi croîtrait-elle

[216] Cf jeux des énergies chapitre 1, sous-chapitre, partie 1.

[217] Max Planck qui avait formulé le troisième principe, dans le cade des températures très basses, avait prévue qu'au niveau seuil critique du zéro absolu, toutes les configurations tendraient vers une configuration unique, faisant du système un corps cristallin.

alors que les conditions sont très proches du zéro absolu ? Lorsque que l'on se rapproche du zéro absolu, peut-on parler d'une croissance ou d'une décroissance de l'entropie ? Nous nous demandons ici, si on ne doit pas reconsidérer le sens de l'entropie de l'univers. Car, une chose est certaine, c'est que l'univers n'évolue dans le chaos au sens des interactions et des collisions à répétition entre les objets qui le composent. Une entropie qui augmente engendre nécessairement le chaos. Mais, au contraire, les états semblent être ordonnés, alors que l'espace s'étire. Loin des interactions de particules qui témoignent d'une entropie élevée, on assiste plutôt à une situation presque cocasse : l'expansion s'effectue en gardant les parties reconstituables, ce qui est tout le contraire d'un système chaotique qui, par définition, perd toujours sa mémoire.

5.2.3. Du macro-état aux micro-états de l'univers : quelle lecture entropique ?

Il convient, tout d'abord, de repréciser que nous pouvons retrouver deux approches majeures de la thermodynamique, à savoir : la thermodynamique phénoménologique et la thermodynamique statistique.

- La thermodynamique phénoménologique est, en fait, une branche thermodynamique qui s'intéresse à l'aspect macroscopique d'un système donné et qui constate les changements opérés dans le système concerné. Le système peut être passé de l'état gazeux à l'état liquide ou de l'état liquide à l'état solide et vice versa. Le qualificatif phénoménologique se rapporte aux phénomènes observables à notre échelle par l'observateur tels que : une eau qui se refroidit, un feu qui brule en faisant tourner un moteur, et même une banane qui murit.
- La thermodynamique statistique s'occupe, elle, du comportement des particules microscopiques invisibles à l'œil nu (mais qui entrent dans la composition du système), et des différentes configurations qu'elles forment au cours de leur évolution. C'est à ce niveau qu'entrent en jeu les collisions, les corrélations, les interactions des particules sous l'effet des contraintes imposées au système telles que la température, la pression etc.

Pour confirmer cela, nous pouvons lire à Wikipédia dans la section consacrée à la thermodynamique ce qui suit :

> La thermodynamique peut être abordée selon deux approches différentes et complémentaires : phénoménologique et statistique. La thermodynamique phénoménologique ou classique a été l'objet de nombreuses avancées dès le XVII^{e} siècle. Elle s'appuie sur de nombreuses

> considérations macroscopiques, pour établir un nombre réduit de principes et de lois issus d'observations expérimentales. La thermodynamique statistique, qui s'est développée à partir du milieu du XIXe siècle, s'appuie, quant à elle, sur des considérations moléculaires et sur le calcul de probabilités appliqué à un grand nombre de particules. Elle s'attache à analyser la structure de la matière et à établir un lien entre les propriétés et les principes de la thermodynamique phénoménologiques. [218]

Cela dit, La thermodynamique est vue sous deux angles. Certains penseurs estiment que la thermodynamique phénoménologique correspond à la thermodynamique classique en raison du fait que c'est elle qui est la première du point de vue historique. Les premiers thermodynamiciens s'intéressaient à l'aspect phénoménologique. Nous pouvons citer James Watt, avec les recherches sur la machine à vapeur, ou Sadi Carnot qui a établi le sens d'écoulement de la chaleur comme allant toujours du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid. On peut également citer Rudolf Clausius qui définit le sens de l'entropie comme toujours croissante. Nous trouvons qu'il est exagéré de dire que l'aspect phénoménologique est classique et que l'aspect statistique est moderne. Il est vrai qu'historiquement parlant, l'aspect phénoménologique précède l'aspect statistique. Mais, il est plus commode de dire simplement que ce sont deux façons d'aborder la thermodynamique : l'aspect macroscopique et l'aspect microscopique. Comme nous avons déjà eu à le dire, les deux aspects vont décrire l'entropie de façons différentes. Un objet physique est sous les deux aspects ; tout dépend de ce que l'on veut voir. C'est pourquoi il n'est pas convenable de dire que l'une approche est classique et l'autre moderne. Dans ce sens, nous allons appliquer à l'univers une lecture phénoménologique, ensuite une lecture statistique de sa thermodynamique, et évaluer son entropie dans chaque cas.

La thermodynamique phénoménologique va décrire l'entropie en termes de mouvement de la chaleur, du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid jusqu'à l'équilibre thermique conformément aux deux premiers principes bien détaillés dans les chapitres précédents auxquels on ajoute le principe zéro : le principe zéro est un principe d'isothermie. Le premier principe est un principe de la conservation d'énergie et le deuxième principe est un principe du sens de mouvement de la chaleur). Ainsi l'entropie, d'après l'approche phénoménologique, correspond au sens de mouvement de la chaleur qui crée des changements de perceptions par l'observateur en ce qui concerne les variables d'état intensives comme la température ou la pression du système qui tendent à s'équilibrer.

[218] *La thermodynamique* in fr.m.wikiopedia.org.wiki/Thermodynamique

Sur un autre angle, d'après l'approche statistique, l'entropie correspond plutôt à des micro-états qui sont des combinaisons différentes des molécules qui constituent le système. Un système thermodynamique aura autant de micro-états qu'il a de particules. Son chiffre, pour un centimètre cube ($1cm^3$) de n'importe quel gaz est un nombre exponentiel correspondant au logarithme de l'ensemble des particules du système, soit *log(W)* multiplié par la constance de Boltzmann, soit k_b. Pour n'importe quel gaz, le nombre d'Avogadro est égal au nombre de moles, à savoir $N_A = 6.22x10^{19}$, et pour la matière en général, il est de $N_A = 6,\ 22x10^{23}$. La thermodynamique statistique nous permet donc de calculer les probabilités de distribution de ces particules dans l'ensemble jusqu'à l'équilibre, le nombre de micro-états, les possibilités de réalisation de ces micro-états etc.

A propos de l'entropie de l'univers, deux angles d'approche différents sont donc envisageables. Si, nous considérons la thermodynamique universelle, l'observateur aperçoit un système qui se refroidit au fur et à mesure que le temps passe. De ce point de vue, nous dirions de prime à abord, tenant compte du deuxième principe que l'entropie augmente, car la chaleur qu'on suppose être partie d'un point très concentré et très chaud, se serait dissipé dans tout le système en chutant progressivement. En reconstituant l'histoire de notre univers, nous voyons que celui-ci s'est refroidit progressivement au fil du temps. On sait que 380 000 ans après le big bang, il était à 3000K. Aujourd'hui, il a une température plus basse. On dit alors que son entropie a augmenté. Mais, si l'on reconsidère les choses, c'est plus compliqué.

Premièrement, nous voyons que les conditions thermiques ne sont pas celles que décrivent le deuxième principe mais plutôt le troisième. Car, le système se refroidit à moins de zéro degré Celsius. Ce qui correspond à une production d'entropie minimale et ainsi de suite jusqu'à des températures très proches du zéro absolu. Nous en reparlerons davantage au chapitre 6 consacré aux situations floues du modèle standard.

Deuxièmement, il y a le risque d'avoir confondu chaleur et température dans le modèle standard. Car, on ne se sait pas très bien de quoi il est question quand on parle du refroidissement de l'univers. S'agit-il d'une chaleur contenue dans le point originel et qui se dissipe progressivement ? Ou alors, s'agit-il de la température régnante dans le big bang ou l'univers primitif, et qui se propage au gré de la détente de l'univers te telle enseigne que, plus ce dernier se détend, plus elle chute ? Les deux ne donnent pas le même résultat. Car, si c'est une chaleur, le

mouvement d'expansion serait dû à l'énergie potentielle issue du big bang ; et l'univers tendrait vers la mort thermique ou plus simplement à l'équilibre thermodynamique, par épuisement de cette chaleur. On aurait alors (S>0). Mais cela n'est pas possible à cause du fait que, si cela avait été une chaleur qui se propage, le big bang serait une énergie potentielle qui se dissout dans tout le système sous forme d'énergie cinétique, en créant le désordre au passage jusqu'à l'atteinte de la mort thermique. Or, la thèse de la mort thermique soulevée par Boltzmann et pour laquelle il mourut d'anxiété ne risque pas de se réaliser, comme cela sera démontré dans la suite du travail (au chapitre 7.2.3). Or, si c'est plutôt une température qui baisse, cela signifie que l'univers connait des phases de températures très basses au fur et à mesure que son volume augmente. Son entropie peut donc théoriquement être minimale à mesure que le système se refroidit tel que cela est observé au point de frôler le zéro absolu. Du point de vue phénoménologique, tout ceci nous rend perplexe par rapport au sens réel de l'entropie. La température qui baisse, l'univers dont les parties peuvent s'emboiter comme dans un jeu de puzzle si on remontait le film de son histoire, toutes choses qui continuent de nous faire questionner le sens réel de l'entropie du grand système thermodynamique géant.

Sous l'angle statistique exploré par Boltzmann, Max Planck, Einstein et bien d'autres thermodynamiciens, la question est tout autre. L'entropie correspond à l'ampleur de l'information. Plus un système est grand, plus, il est susceptible d'effectuer de nombreuses combinaisons et d'avoir de micro-états. Son entropie est donnée à travers le désordre moléculaire qui a cours dans le système grâce aux interactions de particules dues à la chaleur et à la pression jusqu'à ce que le système migre vers la situation macroscopique la plus probable où il y a une égale répartition de température, de pression correspondant à la distribution de Gibbs, pour les ensembles micro-canoniques[219] Voilà ce qui se passe dans le cas d'ensembles micro-canoniques : *« On constate que les probabilités de chaque configuration sont égales quand on se place dans l'ensemble micro-canonique. L'ensemble micro-canonique correspond à l'ensemble probabiliste d'information minimale et toutes les configurations y sont équivalentes »*[220] Dans ce cas de figure, l'entropie est la description du désordre du système. Elle va augmenter graduellement

[219]Les ensembles microcanoniques sont des ensembles statistiques constitués de répliques fictives d'un système réel dont l'énergie E ; le volume V et le nombre de particules N sont fixées.

[220]A. Abada, G. Abramovici, J.-L. Raimbault et G. Roux, *Cours de Physique statistique,* Parcours Physique et Applications & Mécanique, *Licence de Physique* 3`eme année, Université Paris Saclay Orsay, année académique 2015-2016,*Op.Cit.,* p. 22

jusqu'au seuil maximale où se réalise l'équilibre des variables avec la même répartition des contraintes dans l'ensemble. Or, quand il nous arrive de l'appliquer à l'univers, la chose devient complexe. Nous avons majoritairement des zones de très basse densité comme l'espace intergalactique avec une moyenne d'un atome par mètre cube d'air. Ici, l'on est en deçà de la densité critique qui est de 5 atomes en moyenne par m^3. (La densité critique $\rho_{ço} = \frac{3H2}{8\pi G} = 4{,}47.10^{-30} g/cm^3$, soit environ 5 atomes par m^3 avec H constante de Hubble). Les combinaisons sont donc faibles et la pression n'y existe pas pour favoriser les différentes combinaisons. Ces milieux sont donc des milieux presque ordonnés avec des atomes qui sont à la limite de la non-vibration. On sait qu'à partir du zéro absolu, les atomes ne vibrent plus. Or, la température est presque à deux degrés au-dessus du zéro absolu. L'entropie du milieu intergalactique est donc très basse. Par ailleurs, il y a des milieux où la densité est très élevée. Ceci montre que l'univers, du point de vue de la thermodynamique statistique ne présente pas une entropie facile à cerner.

Cela dit, contrairement aux milieux intergalactiques et interstellaires, dans les étoiles, la chaleur est souvent très haute présentant des particules très excitées au point d'arracher les électrons de leurs noyaux pour former des plasmas chauds. Ces plasmas chauds représentent l'état de la matière qui constitue les étoiles. Les étoiles, par la chaleur qu'elles génèrent, constituent des sources thermiques. Or, le feu n'est rien d'autre qu'une combustion qui dégage de l'énergie sous forme de chaleur. C'est ce que nous rappelle le titre du mémoire de Sadi Carnot sur l'entropie ; à savoir *Réflexion sur la puissance motrice du feu et les machines propres à développer cette puissance.* Donc, le feu est une source de chaleur, c'est-à-dire d'entropie. L'entropie des étoiles est donc très élevée.

A côté des étoiles qui présentent des plasmas chauds à entropie très élevée puisque qu'elles sont des sources thermiques très importantes, il faut également considérer les trous noirs dont l'entropie est toujours croissante. C'est ce que nous lisons dans un document de *Wikipédia* parlant de l'entropie des trous noirs :

> Le résultat trouvé par Hawking fut surprenant et très général : quelles que soient les masses, les charges électriques et les moments cinétiques des deux trous noirs, la quantité maximale d'énergie qu'ils pouvaient rayonner était telle que la surface du trou noir final devait être supérieure ou égale à la somme des deux surfaces des trous noirs. Un tel résultat présentait une

> analogie frappante avec le second principe de la thermodynamique, qui stipule que l'entropie d'un système ne peut que croître au cours du temps.[221]

En effet, Stephen Hawking a montré que l'entropie d'un trou noir qui correspond à sa surface ne peut que croitre au cours du temps. Les trous noirs sont donc des zones de très haute entropie. Il contribue à élever l'entropie de l'univers.

Il y a donc trois situations différentes qui permettent de parler de l'entropie statistique :

- l'une qui voit l'entropie de l'espace intergalactique presque nulle avec une équiprobabilité de présence d'un atome dans chaque volume de gaz intergalactique.

- La seconde voit cette entropie très élevée dans les étoiles, zone les plus chaudes de l'univers,

- La dernière qui voit l'entropie des trous noirs augmenter de plus en plus. Ces trois cas sont ceux où les particules se combinent, s'entrechoquent et interagissent dans l'univers.

D'après l'analyse de ces trois cas, nous pouvons penser qu'au final, l'augmentation d'entropie l'emporte sur la l'inactivité des atomes de plus en plus rares du milieu intergalactique, car l'entropie des étoiles est très élevée avec l'activité de combustion. Les étoiles sont des sources de chaleur qui produisent une entropie hautement élevée à des niveaux où les gaz sont transformés en plasmas chauds. L'entropie de ces plasmas est très élevée également. Or, ces étoiles sont appelées à fondre en trous noirs dont l'entropie ne pourra qu'augmenter conformément au deuxième principe de thermodynamique. Les trous noirs devront encore absorber les atomes qui se trouvent dans leur *rayon de Schwarschild*[222]pour augmenter leur masse et leur entropie. Ainsi, au niveau statistique, on peut aboutir à la conclusion que l'entropie de l'univers est croissante

[221]Entropie des trous noirs- définition in https://www.techno-science.net

[222] Le rayon de Schwarzschild d'un trou noir correspond à son horizon des événements, c'est-à-dire à la zone à partir de laquelle la vitesse de libération atteint celle de la lumière.

CHAPITRE 6 : LES SITUATIONS FLOUES DU MODÈLE STANDARD

Dans ce chapitre, il s'agit de montrer que le modèle standard, comme le dit son nom, est le plus fiable et le plus plausible en matière de cosmologie scientifique à l'heure actuelle. A n'en pas douter, il y a eu un foisonnement de modèles cosmo-scientifiques depuis que l'homme s'intéresse au ciel et à ce qui s'y trouve. Et comme l'histoire des idées en sciences n'est pas un long fleuve tranquille, des théories se sont bousculées les unes les autres jusqu'à la théorie du big bang venue détrôner la théorie de l'état stationnaire depuis la découverte du fond diffus cosmologique en 1965 par Arnold Penzias et Robert Wilson confirmant la thèse du rayonnement fossile 380 000 ans après le big bag à la température de 3000K comme l'avait prévu plusieurs physiciens à l'instar de George Lemaître et bien d'autres. Mais, dans ce chapitre, nous montreronsquelques incongruences du modèle standard ΛCDM qui engendrent parfois des pétitions de principes. Nous adopterons l'attitude lakatosienne qui conseille de maintenir le noyau dur dans le cadre d'un programme de recherche et de corriger ses éléments isolés qui constituent parfois être des conjectures *ad hoc*, c'est-dire des hypothèses que la science n'a pas encore clarifiées, mais qui conviennent pour la circonstance pour que l'ensemble de l'édifice tienne debout. Ceci nous servira de raison suffisante pour postuler une thermodynamique alternative de l'univers proposant des pistes de réflexion nouvelles.

6. 1. Equations, formules et axiomes querellés

6.1.1. Du *théorème à 3 corps* au paradoxe d'un univers non chaotique *à n corps* et le rôle des relativités galiléennes et einsteiniennes

Henri Poincaré est celui qui a découvert le chaos déterministe à travers *l'équation à trois corps*. Il montre qu'un système à trois corps est un système non-intégrable qui finit par être instable. Son amplification exponentielle, à savoir le système à *n corps* engendre une situation de *chaos déterministe*[223], grâce aux divergences de trajectoires des corps impliqués qui aboutissent

[223] Le chaos déterminisme est l'autre nom du chaos moléculaire. C'est en fait un oxymore (rapprochement de termes contradictoires) qui décrit une situation où les lois de la dynamique, bien que toujours présentes dans un système, ne peuvent plus permettre de prédire ou retrodire avec exactitude l'avenir ou le passé dudit système. Le système semble alors être gouverné par un principe stochastique alors que les lois sont toujours présentes. C'est juste que ces lois s'entremêlent dans un univers complexe où même une intelligence laplacienne serait incapable de connaître les états présents, passés et futurs bien qu'elle ait toutes les données.

nécessairement aux collisions et corrélations entre les différentes particules qui constituent ledit système. Ces divergences sont à l'origine d'une nouvelle situation complexe qui échappe aux prévisions et aux calculs. Les divergences qui prendront plus tard le nom *divergences de Poincaré*[224]. Elles représentent les déviations infimes des mobiles dans les trajectoires initiales rendant le système instable et chaotique. Nous disions dans un travail précédent que :

> Ces divergences constituent la grille d'analyse d'une formulation nouvelle des lois de la physique à savoir une formulation statistique dont l'accentuation donne lieu à des résultats indéterminés et imprédictibles. Le chaos déterministe est donc un cas typique de la thermodynamique des phénomènes de non-équilibre qui montre la liberté de la nature et son refus de se laisser totalement contrôler par des lois.[225]

Au début elles seront considérées par Poincaré comme une erreur dans les calculs. Ce qui naguère fut ainsi considéré s'avèrera être une propriété intrinsèque de la nature. La nature n'était point gouvernée par des lois déterministes et linéaires de la dynamique classique comme on le croyait, mais elle est plutôt gouvernée par des *lois chaotiques*[226]qu'imposent la complexité des systèmes réels de la nature. Cela dit, commençons par rappeler les circonstances historiques qui ont présidé à la découverte du *chaos déterministe* pour cerner l'intelligence du concept.

En effet, Pierre Henri Poincaré, grand physicien français fit prendre conscience de l'instabilité des systèmes à *3 corps* en gagnant un prix Nobel de physique en 1889 lors d'un concours international de mathématique et de physique organisé par le roi Oscar II de Suède et de Norvège. Sa contribution fut la présentation d'un mémoire sur *« Le problème à trois corps et les équations de la dynamique. »* Poincaré croyait aboutir aux mêmes résultats entre un système *à 3 corps* et un système à *2 corps* dont les résultats étaient connus par la physique de l'époque comme étant nécessairement déterministes et prédictibles. On peut facilement prédire l'évolution d'un système à deux corps en tenant compte des interactions mutuelles entre les deux corps en question. Pour Henri Poincaré, comme pour tous les physiciens de l'époque, cela ne constituait l'ombre d'aucun doute. Poincaré partit, en effet, de l'étude du système solaire pour illustrer le système à trois corps (notamment l'étude des trajectoires orbitales Soleil-Terre-Lune). Mais,

[224]*Les divergences de Poincaré* sont la clé de compréhension de la découverte du chaos déterministe par Poincaré. Ce sont elles qui finissent par créer le chaos grâce aux perturbations qu'elles engendrent.
[225]FOE Jospin Brice, *De la dynamique classique à la thermodynamique des processus de non-équilibre : une ontologie de la nature à partir de la physique, chez Ilya Prigogine* (mémoire), 2020, inédit, 2020, p.68

[226]*Les lois du chaos* sont un oxymore souvent utilisé par Ilya Prigogine qui montre que le chaos n'est pas aussi désordonné qu'il semble. Il y règne des chaines de déterminismes qu'une intelligence fusse-t-elle laplacienne ne peut plus suivre.

chose curieuse, Poincaré aboutissait toujours à un échec qu'il voulut d'abord mettre sur le compte de l'inexactitude des calculs ou simplement de l'erreur humaine. Mais le problème était plus profond ; il ne s'agissait guère de l'inexactitude des calculs ou d'une erreur anthropique, mais plutôt d'une propriété fondamentale de la nature. C'est le système à *trois corps* lui-même qui est spécial. C'est une nouvelle catégorie en physique qui demande l'élaboration de nouvelles lois : *les lois du chaos*. Le système à trois corps était bel et bien un système non plus déterministe, mais plutôt chaotique. L'échec devint donc le point de départ d'une nouvelle science. Henri Poincaré démontrera, pour la première fois, un phénomène chaotique. Le résultat de son étude fut que la gravité aurait beau obéir à des lois physiques, celle-ci engendre un phénomène chaotique, c'est-à-dire un ensemble d'ordre et de désordre. C'est ce qu'on appellera plus tard le chaos déterministe.

Sa découverte démontre deux choses, à savoir :

- D'abord : les lois non-linéaires de Newton finissent par engendrer des mouvements chaotiques ;
- Ensuite : un mouvement chaotique, c'est-à-dire un mouvement constitué de 3 corps ou plus, peut paraitre stable durant longtemps, on finira par constater qu'il était chaotique et qu'il est sorti de son îlot de stabilité.

Ainsi, les phénomènes à trois corps sont des phénomènes instables, donnant lieu à des systèmes *non-intégrables.*[227]Dans de pareils systèmes, les collisions finissent toujours par avoir lieu. Ces collisions permettent de mesurer l'accroissement de l'entropie du système. Les systèmes à trois corps, à défaut d'être chaotiques sont également instables. D'où les nombreuses collisions internes des éléments du système. Mais, le problème qui se pose est que, si nous appliquons cela à l'univers, on se rend compte que le résultat n'est pas ce qui est attendu. Du point de vue macroscopique, l'univers est constitué d'étoiles qui baignent dans l'espace interstellaire. Il est donc un système à *n corps*. La question que l'on se pose est celle de savoir : pourquoi ces corps ne se percutent pas les uns les autres, de façon continue, comme le prévoit la théorie *n corps* ? On devrait assister à un système-univers semblable à un jeu de billard avec de nombreuses et interminables interactions et de collisions, comme dans n'importe quel chaos déterministe. Mais,

[227] La non-intégrabilité décrit la situation d'un système ayant son propre principe de mouvement à cause de sa situation chaotique qui engendre le non-équilibre contrairement aux phénomènes intégrables dont l'énergie potentielle est nulle.

qu'est-ce qui explique la stabilité et la régularité des mouvements de l'univers ? Pourquoi la théorie ne fonctionne-t-elle pas ?

Le vrai problème est que ces corps qui constituent le contenu de l'univers sont pris dans le mouvement de l'expansion qui augmente leur distance mutuelle. Ainsi, puisque les corps sont plutôt pris dans le mouvement d'expansion, il est possible que l'univers, dans son ensemble, ne forme pas, tout à fait, un système à *n corps* au sens du chaos déterministe d'Henri Poincaré, et qu'en plus, son entropie ne soit pas finalement entrain d'augmenter. On dirait plutôt qu'il y a de plus en plus de vide interstellaire pendant que l'univers s'étire sous la force de l'expansion. Si l'entropie mesure le taux de désordre du système, ce système devrait être en même temps chaotique, c'est-à-dire présentant à chaque fois de nouvelles configurations dues à des combinaisons incessantes des particules dans leurs trajectoires à cause des interactions persistantes. L'avenir d'un tel système échappe nécessairement à l'observateur. Or, ce n'est pas ce qui se passe à l'observation. A l'observation, le système est stable et beaucoup légaliste. Deux facteurs peuvent expliquer cela :

- Les étoiles et les planètes se déplacent dans les trajectoires rectilignes uniformes (MRU), à des vitesses constantes.

En effet, Galilée, l'auteur de la relativité avait déjà posé qu'un corps subissant le principe d'inertie persistera dans sa course de façon rectiligne uniforme, et à vitesse constante. C'est le principe du référentiel galiléen[228]. Maintenant, combinons la relativité galiléenne avec la relativité einsteinienne[229], le résultat est surprenant : les objets (les mobiles galiléens) continuent de se mouvoir de façon rectiligne uniforme, mais comme l'espace est courbée par la masse importante des étoiles, ils subissent la courbure de l'espace-temps. D'où le deuxième facteur :

- Les étoiles et les planètes sont piégées dans les sillons d'un espace-temps courbé par le contenu massique des corps voisins. Le continuum spatio-temporel n'est donc pas lisse mais courbé ou plissé.

[228] Le principe d'inertie évoqué dans le problème des référentiels galiléens repose sur le principe du mouvement rectiligne uniforme loi (MRU). Elle s'énonce comme il suit : tout corps abandonné à lui-même et ne subissant aucune force extérieure, est animé d'un mouvement rectiligne uniforme.

[229] La relativité générale d'Einstein, qui repose sur la déformation de l'espace-temps par les objets massifs qui le constituent, peut s'énoncer de façon littéraire comme il suit : la matière dit à l'espace comme il doit se déformer et au temps comment il doit ralentir ; et l'espace dit à la matière comment elle doit se mouvoir.

Si le principe de la relativité galiléenne est vérifié, à savoir un mouvement rectiligne, uniforme à vitesse constante, comme le font les planètes, il reste maintenant à voir comment la relativité générale intervient, empêchant le système d'être chaotique comme l'avait prévu Poincaré.

En effet, les étoiles et les planètes se déplacent de façon rectiligne uniforme à vitesse constante, et persévèrent dans leur course, comme l'avait prévu Galilée. Cependant, pourquoi ne s'entrechoquent-ils pas comme l'aurait prévu le système à *n corps* ? La réponse se retrouve au-delà de Galilée. C'est à cause de la déformation de l'espace-temps dans lequel ils baignent. En fait, elles suivent des trajectoires dans lesquelles elles sont piégées par cette déformation de l'espace-temps par des corps plus massifs, à l'exemple d'un cours d'eau piégé dans un lit qu'il doit suivre sans autre possibilité. Les étoiles et les planètes ne se déplacent donc pas en désordre, mais elles suivent des couloirs et des sortes de tranchées de l'espace-temps subissant une déformation. On peut alors comprendre la formule littérale de la relativité générale : **l'espace dit à la matière comment elle doit se mouvoir et la matière dit à l'espace comment il doit se déformer et au temps comment il doit ralentir.**

Au final, le tapis de l'espace–temps est déformé et plissé avec des couloirs. Les corps y sont piégés et suivent des trajectoires presque régulières leur évitant des collisions et des entrechocs, contrairement à ce qui est prévu par la théorie à *n corps* qui entrevoyait un chaos déterministe de l'ensemble du système après un certain temps. Certes, le système est non-intégrable et instable, mais n'est pas chaotique comme l'avait prévu Henri Poincaré. Et pour cause, Henri Poincaré avait raison sur la théorie considérée dans le cadre d'un espace sans courbure où les corps ne subissent pas d'autres forces que leurs propres masses et où aucune force extérieure n'est exercée sur eux. Par contre, la théorie d'Einstein intègre les effets de la courbure de l'espace-temps qu'Henri Poincaré ne connaissait pas au moment de la découverte du théorème à 3 corps. Comme nous l'avons souligné, ce théorème est découvert en 1890 alors que les deux relativités d'Einstein sont découvertes entre 1905 et 1915. Mais dans un espace plat, la relativité galiléenne aboutirait aux collisions prévues par le théorème à *n corps* d'Henri Poincaré. Par contre, si on intègre les courbures de l'espace-temps, les planètes et les étoiles sont piégées dans des couloirs spatio-temporels qui ne rendent plus les collisions évidentes.

Cela dit, si on se place du côté de la régularité des trajectoires rectilignes uniformes, on aboutit à la conclusion selon laquelle nous sommes dans un système-univers non chaotique à *n corps*. Car les étoiles et les planètes vont en ligne droite, mais c'est l'espace-temps lui-même qui est courbé. Ces corps y sont piégés et respectent des trajectoires déterministes auxquels ils ne peuvent échapper. Ils subissent ainsi les effets de la déformation de l'espace-temps par les corps massiques autour desquels ils gravitent.

La gravitation des corps célestes autour d'un axe s'explique donc par la relativité galiléenne (mobile galiléen dans un référentiel galiléen) à laquelle s'ajoute la relativité générale qui établit que l'espace-temps subit des courbures due à la masse des corps. Ce sont ces courbures qui piègent les corps dans des trajectoires déterministes où ils se déplacent de façon ordonnée et réglée comme une bille sur une piste ou alors un fleuve dans un lit, échappant ainsi au chaos.

En dehors des courbes et des canaux qu'engendre la déformation de l'espace-temps, il faut compter avec le rôle trouble de l'énergie noire qui rend le système non-chaotique à l'opposé de ce qu'aurait fait une énergie potentielle. S'il fallait introduire l'énergie potentielle due à la chaleur initiale renfermée dans le point initial, ne serait-ce que dans une simulation informatique, on assisterait au chaos au sens pur du terme. En effet, une pareille simulation aurait engendré une infinité incessante d'interactions de particules, démontrant que l'entropie du système est très élevée. Et le système lui-même aurait été un système non-intégrable, c'est-à-dire qu'il serait instable et non prédictible. Or, ce n'est pas le cas du mouvement des astres dans les systèmes qu'ils forment avec leurs étoiles ou les mouvements des galaxies. L'occurrence de l'énergie noire et la déformation de l'espace-temps piégeant la matière, permettent de relancer le débat sur l'ordre et le désordre d'un pareil système. En effet, comment travaille l'énergie noire ? C'est une énergie qui est plus forte que la gravité et qui agit en repoussant les objets de l'univers qui s'éloignent de plus en plus les uns des autres. Par conséquent, les collisions, les chocs et les entrechocs sont moins envisageables, sur la base de cette théorie de l'éloignement des galaxies et des étoiles. L'expansion de l'univers crée de plus en plus de la distance entre les corps en diminuant les risques d'interactions dans un système complexe comme le nôtre. Un univers complexe comme le nôtre est constitué d'une infinité de corps. Sans la déformation de l'espace-temps et ses sinuosités, et sans la force répulsive de l'énergie noire, l'univers serait un univers

essentiellement caractérisé par des collisions de planètes, d'étoiles etc. Mais, loin de là, nous sommes dans un système à *n corps* mais non chaotique, à cause de deux principes non pris en compte par le théorème à *n corps* : la déformation de l'espace-temps et la force répulsive de l'énergie noire.

6.1.2. *Théorème H* de Boltzmann et paradoxe d'un univers qui a gardé sa mémoire

Ici, il est question de revenir intensément sur un problème déjà évoqué plus haut à savoir le comportement de l'entropie par rapport à la température de l'univers. Rappelons qu'il y a plusieurs façons d'exprimer l'entropie suivant le type de thermodynamique dans lequel on se trouve. Ainsi, on distingue deux niveaux principaux de thermodynamique dans les chapitres précédents :

- La thermodynamique classique avec un penchant phénoménologique

Elle comprend les travaux des pionniers qui ont essentiellement travaillé sur les transformations de la chaleur en travail.

- La thermodynamique moderne qui se fonde davantage sur les questions statistiques.

A chaque niveau, nous pouvons envisager une façon spécifique de décrire l'entropie. Ainsi, nous pouvons parler selon le domaine où on se trouve :

- L'entropie de Rudolf Clausius qui permet de calculer la transformation de la chaleur en travail où la variation d'entropie $\mathbf{\Delta S= \frac{\Delta Q}{T}}$**.** C'est à ce niveau qu'on peut introduire l'énergie mécanique puisqu'il s'agit d'une force qui travaille. L'entropie sera donc relative à la distribution de l'énergie cinétique issue de l'énergie potentielle dans tout le système quitte à conduire celui-ci dans la mort thermique qui correspond à l'équilibre de ses variables d'état intensives dans tout le système. James Watt appelait l'énergie potentielle capable de produire du travail, et celle incapable d'en produire, il l'appelait énergie inutilisable.
- L'entropie de Boltzmann qui permet de calculer les micro-états d'un système thermodynamique. Il est exprimé par la célèbre formule de l'entropie connue même des profanes ou des amateurs, comme n'importe quel profane connaitrait la formule de la relativité restreinte sans être vraiment familier à l'univers de la physique. Cette formule s'énonce **S =Kb.lnW**. Elle traduit davantage le désordre d'un système thermodynamique

plutôt que le comportement de son énergie. Car, Boltzmann était davantage préoccupé par le volet statistique de la physique. Comme tel, il est un des pionniers de la thermodynamique statistique. Aujourd'hui, on distingue d'une part la thermodynamique statistique et la thermodynamique phénoménologique.

- L'entropie de Shannon qui relève davantage de la théorie de l'information. Elle est surtout utilisée dans les systèmes informatiques. Elle correspond à la quantité d'informations contenue ou fournie par une source d'information. Elle mesure le degré d'incertitude d'un évènement x zen fonction de la connaissance que l'on en a. Par exemple, le fait que le soleil puisse se lever demain a un degré de certitude très élevée donc l'entropie est faible. Par contre, le fait que le trouve de l'argent sur ma route demain a un degré de certitude très petit. Donc son entropie est forte ou très élevée.

Cela dit, revenons à notre problème. Prenons le cas de l'entropie de Boltzmann pour tenter de poser le problème. Nous avons dit que l'entropie de Boltzmann calcule l'ensemble des micro-états par où est passé le système avant de se stabiliser dans la situation microscopique la plus probable de se produire. Cette situation microscopique la plus probable se produire est le macro-état le plus probable. Pour comprendre, faisons une expérience de pensée. Si nous prenons des molécules de n'importe quel gaz que nous mettons dans une enceinte faite de deux compartiments. Au départ de notre expérience, toutes les molécules sont dans un seul compartiment. Au bout d'un certain temps, les molécules vont progressivement se disséminer dans l'ensemble des deux compartiments. Une photographie de l'enceinte aux moments *x, y et z* nous montrera des molécules dans un seul compartiment au moment *x* ; puis, la plupart des particules dans un seul compartiment et quelques-unes dans l'autre compartiment au moment *y* ; enfin les molécules sont équilibrées dans les deux compartiments au moment *z*. La dernière situation, à savoir que les molécules sont équilibrées dans les deux compartiments est la situation macroscopique la plus probable où un observateur trouvera le système. Elle correspond au macro-état du système. Et le fait qu'elles se retrouvent dans un seul compartiment est la situation microscopique la plus improbable. Du point de vue macroscopique, cette situation n'est pas envisageable, bien qu'elle représente un micro-état possible mais très improbable statistiquement.

Au vu des observations, la question que l'on se pose est celle de savoir si le contenu de l'univers se combine vraiment pour passer en revue tous les micro-états par lequel le système-univers est passé. Cela revient à vérifier, dans un système donné tel que le système solaire

constitué de neuf planètes, comment les neuf planètes se combinent les unes avec les autres dans la mesure où l'entropie est réellement élevée et sans cesse croissante tel que le prévoit le modèle standard, en conformité avec les derniers chiffres qui affirment que l'entropie de l'univers est sans cesse croissante. On devrait aboutir une situation où le soleil est plus proche de la planète Mercure au moment *x,* ensuite une situation où il est plus proche de la planète Saturne au moment *y* ; et des moments où il est plus proche de la planète Jupiter au moment *z*,etc. C'est ce que prévoit l'entropie de Boltzmann qui mesure les différentes combinaisons des éléments à l'intérieur du système pour établir le comportement de l'entropie. Or, pour ce qui est du système solaire, nous répondrons par la négative, en nous basant sur la théorie de l'expansion de l'univers qu'il faut bien comprendre. La théorie expansionniste est une théorie qui correspond au modèle standard de la cosmologie et qui soutient que l'univers ne cesse de s'étendre en s'étirant depuis le big bang. La théorie expansionniste ne dit guère que les étoiles, qui constituent le contenu de l'univers, sont en mouvement. Le cas échéant, la théorie serait contradictoire à la relativité restreinte qui établit la lumière comme une constante universelle en physique. 299 792 458m/s presque 300 000 000 m/s. Yann Verdo affirme que

> Dans le vide, la vitesse de la lumière est d'environ 299 792458 mètres par seconde (ou environ 1,08 milliard de kilomètres par heure). Cette constance de la lumière dans tous les référentiels inertiels est l'un des piliers de la physique moderne…La théorie de la relativité générale/restreinte d'Albert Einstein, qui repose sur le postulat de la constance de la vitesse de la lumière, a bouleversé les notions traditionnelles de temps, d'espace et de mouvement. Elle a montré que la vitesse de la lumière agit comme une limite qui détermine la façon dont les événements se produisent et interagissent dans l'univers.[230]

Cela dit, les corps s'éloignant à une vitesse supérieure à celle de la lumière contrediraient la théorie. Il n'en est rien. Il s'agit plutôt de comprendre l'expansion comme un gonflement de l'espace-temps. C'est l'espace-temps lui-même qui ne cesse de gonfler en créant de plus en plus de la distance entre les parties de l'univers observable. Cette vitesse d'éloignement est donnée par la formule de Hubble déjà énoncée plus haut, à savoir **v = Ho.r**. Plus la variable (r) qui représente la distance entre les deux corps est grande, plus le produit Ho.r est important au point où la vitesse d'éloignement (v) peut être supérieure à célérité de la lumière dans le vide (c). Cela revient à dire que le mouvement d'expansion de l'univers n'influence pas les positions des objets qui en constituent le contenu. Cela est bien aux antipodes de ce qu'a prévu Boltzmann en matière

[230] Yann Verdo, *La vitesse de la lumière : Tout ce qu'il faut connaître !*inhttps://superpof.frposté le 23 juin 2023

de désordre dans les systèmes dynamiques non intégrables. Boltzmann avait prévu le contraire à travers sa célèbre formule.

En effet, il avait prévu que le système passerait par des micro-états dont le chiffre serait le logarithme de toutes les particules présentes. D'après la formule, les particules en mouvement, effectueront tellement de collisions en créant de nouvelles trajectoires à chaque moment que le système deviendrait instable. La formule de Boltzmann milite donc en faveur d'un désordre cosmique sans cesse croissant. Mais, ce que nous avons dit à l'égard du chaos déterministe de Poincaré, nous le disons également à propos de la formule de Boltzmann dont les configurations totales du système correspondent au logarithme des particules engagées dans l'expérience. La solution prévoit que l'entropie augmente jusqu'au seuil maximal, à travers les mouvements désordonnés et les changements des positions de trajectoires des particules. Pour ce faire, dans le cas de Boltzmann, l'expérience prévoit la distribution des vitesses, ce qui est en rapport avec la pression. Or, le travail peut être donné par la pression-volume, d'après le premier principe de thermodynamique, soit **E=Q+W.** Comme nous l'avons vu, cette expression peut mathématiquement être remplacée par **E= -PV+Q.**

Dans le cas de l'univers, la pression-volume travaille comme une énergie potentielle qui met les particules de gaz dans une situation de *scattering*[231].Dans les systèmes isolés, la pression-volume équivaut à l'énergie totale du système, car le système ne prévoit aucune autre forme d'énergie venant de l'extérieur. C'est cette pression qui causait donc le chaos chez Boltzmann tout en augmentant l'entropie du système dans le théorème H. Le système de Boltzmann était donc chaotique à cause de cette énergie introduite sous forme de pression. Or, nous avons dit que la pression de l'univers est problématique, car l'univers n'a pas de frontières pour avoir une force qui presse de façon égale dans toutes les directions. L'énergie totale de l'univers serait donc nulle, comme l'avait prévu Pascual Jordan, à la grande surprise d'Albert Einstein. Prigogine raconte : *« Gamow raconte la stupeur d'Einstein lorsqu'il lui fit part de la remarque de Jordan : on pourrait admettre que l'énergie de l'univers est nulle… de ce point de vue, on pourrait donc*

[231] En mécanique statistique classique, un gaz est un grand nombre de molécules en *interactions persistantes*[231] les unes aux autres suivant les lois de la mécanique classique. L'interaction est une situation où les molécules libres sont projetées contre une cible. C'est le phénomène de dispersion ou *scattering* (le terme anglo-saxon qui est aussi plus utilisé en français).

affirmer qu'il n'y a pas de différence énergétique entre notre Univers et un univers vide ».[232]Les corps se meuvent comme dans un référentiel galiléen de façon rectiligne uniforme, abandonnés à leur propre inertie dans les tissus déformés de l'espace-temps autour des axes de rotation qui sont des corps massifs. Ces mouvements, contrairement à l'expérience de Boltzmann et à sa formule, sont réguliers et sans possibilités de collisions. Par contre, le vide interstellaire augmente entre les étoiles sans pourtant nécessairement signifier que l'entropie augmente. Pour essayer de comprendre, le big bang n'a pas certainement été une déflagration à la manière d'une bombe qui explose mettant tout en désordre. Il s'agirait plutôt d'un point initial infiniment petit qui a gonflé subitement gardant tout dans sa position intacte. C'est pourquoi l'univers a gardé sa mémoire et que l'on peut facilement remonter son histoire au vu de son observation présente. Or, dans un environnement chaotique, le système ne garde pas sa mémoire. C'est un système dont le présent ne peut pas permettre ni de retrodire le passé ni de prédire le futur. L'expansion de l'univers conserve dans l'ordre dans l'univers et permet d'écrire l'histoire de l'univers autrement que les calculs sur les systèmes classiques auraient prévu. La question du désordre est donc remise en question.

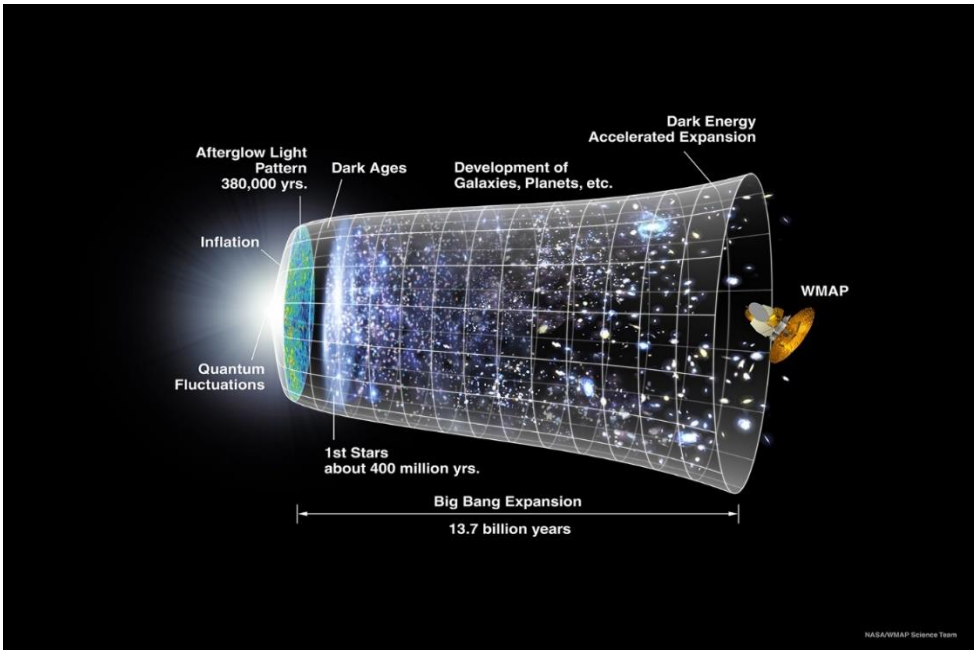


Figure 17 : illustration représentant le gonflement de l'univers depuis le big bang et permettant retracer son histoire

[232]*Prigogine Ilya et Stengers Isabelle, La Nouvelle Alliance Métamorphose de la science, Paris, Gallimard, 1979, Op.Cit.,* p. 211.

Nous nous rendons compte que l'univers a gardé sa mémoire. En regardant son histoire, on peut reconstituer son passé. Cela prouve que le big bang n'a pas été semblable à une déflagration comme celle produite par une bombe. Mais, il correspond plutôt à un gonflement qui suit une inflation ordonnée, donc non-chaotique.

6.1.3. Paradoxes d'univers extrêmement froid à entropie croissante : violation du 3e principe ou mauvaise saisie du problème ?

Rendu à ce niveau de notre réflexion, nous pouvons déjà nous rendre à l'évidence que l'entropie de l'univers n'est pas quelque chose d'évident, surtout du point de vue des calculs et des mesures. Plus de deux siècles après ses premières élaborations par James Watt ou sa première formulation par Sadi Carnot et sa mise en forme par Rudolf Clausius qui forgea le concept d'entropie, et d'autres grands esprits comme Max Planck ou Ludwig Boltzmann qui participèrent également à l'élaborations de quelques principes fondamentaux, les débats restent toujours aussi vifs. Un sentiment d'inconfort cognitif est toujours partagé parmi les plus grands spécialistes de thermodynamique concernant le principe d'une entropie universelle. Nous avons donc à affaire, de toute évidence, à quelque chose de flou et de paradoxal. D'après la présente réflexion, l'entropie de l'univers ne serait pas loin d'être ce que les mathématiciens appellent un théorème irrésolu. Pour soutenir ce point de vue, nous allons donner deux arguments :

- *Situation floue d'une entropie mal définie au moment du big bang*

C'est quelque chose de crucial, mais qui demeure une conjecture indécidable, car personne ne saura dire exactement ce qu'il en était à cause du fait que la science ne peut pas régresser jusqu'à ce niveau tout en gardant l'objectivité de ses mesures. On ne saurait donc exactement dire quelle était l'entropie réelle qui régnait au moment du big bang pour conclure si elle augmente ou si elle diminue. A ce niveau, nous avons dit que tout dépendait des modèles physiques proposés. Certains modèles estimeraient que l'entropie aurait été de l'ordre de zéro, car selon la formule de Planck simplifiée par Boltzmann, une seule configuration, comme celle qu'aurait constitué le point initial, ne peut donner qu'une entropie nulle. En effet, mathématiquement parlant, log (1) est égal à 0 dans la formule **S=Kb.logW**. Mais les conditions possibles au sein de ce point initial ne permettent pas de valider aisément une telle conclusion. Car, pour que cela soit réalisé, il faudrait que la température soit de l'ordre de 0 Kelvin, ce qui

reste impossible. La nature n'a jamais permis d'assister à une telle condition. Bien plus, cela n'aurait pas été possible alors que l'on sait que le point initial aurait été un point infiniment chaud et dense. La formule de Boltzmann et Max Planck ne marche donc pas. C'est ce que nous dit cet article tiré d'un article d'astrophysique publié par Ludovic Thébault : *« À l'origine, on a un milieu, très chaud et très dense, concentré en un point. Ce point serait moins gros qu'une particule d'atome !* »[233] Cela étant, théoriquement, il peut être facile d'écarter cette hypothèse comme étant une hypothèse improbable, bien qu'on ne sache pas grand-chose de ce qu'il en était, même si réellement, cela a pu être possible, car il s'agit là d'une singularité qui échappe aux lois de la physique relativiste d'Einstein et des principes thermodynamiques connus.

Non satisfait jusque-là, si on suppose, à l'opposé, que l'entropie a plutôt été minimale, il faut encore spécifier les conditions de cette production d'entropie minimale. L'entropie minimale est une situation qui s'explique par la thermodynamique non-linéaire ou la thermodynamique des processus irréversibles de non-équilibre. C'est la thermodynamique des processus loin de l'équilibre qui est à l'origine de l'auto-organisation de la matière :

> When the thermodynamic forces acting on a system become such that the linear region is exceeded, however, the stability of the stationary state, or its independence from fluctuations, can no longer be taken for granted. Stability is no longer the consequence of the general laws of physics. We must examine the way a stationary state reacts to the different types of fluctuation produced by the system or its environment. In some cases, the analysis leads to the conclusion that a state is "unstable"-in such a state, certain fluctuations, instead of regressing, may be amplified and invade the entire system, compelling it to evolve toward a new regime that may be qualitatively quite different from the stationary states corresponding to minimum entropy production. Thermodynamics leads to an initial general conclusion concerning systems that are liable to escape the type of order governing equilibrium. These systems have to be "far from equilibrium." In cases where instability is possible, we have to ascertain the threshold, the distance from equilibrium, at which fluctuations may lead to new behavior, different from the "normal" stable behavior characteristic of equilibrium or near-equilibrium systems… Part of the energy of the system, which in laminar flow was in the thermal motion of the molecules, is being transferred to macroscopic organized motion. [234]

De ce qui précède, on peut retenir que la thermodynamique non-linéaire est une thermodynamique qui engendre finalement une auto-organisation de la matière grâce aux fluctuations qui produisent des phénomènes dissipatifs réalisés sous l'influence de l'environnement et des effets au bord du système. Mais, parlant du big bang, cette hypothèse est également insoutenable, car elle reviendrait à dire que, non seulement on envisage l'existence des

[233]Ludovic Thébault , *L'univers, l'espace et la matière*, inhttps://www.botanic06.com/site/evol.htm
[234]Ilya Prigogine and Isabelle Stengers, Order out of chaos, Man's new dialogue with nature, A Bantam Book, 1984, *Op.Cit.,* p. 141-142

frontières à l'univers primitif, mais aussi et surtout qu'il y eut un environnement extérieur qui lui aurait permis de réaliser une situation de production d'entropie minimale par la production de phénomènes dissipatifs et des fluctuations réalisés grâce à l'influence de cet environnement supposé. Cela est complètement inouï que de poser le postulat d'un univers et d'un non-univers qui lui servirait d'environnement extérieur. Nous pensons que l'hypothèse d'une production d'entropie minimale serait encore difficile à admettre. Reste à examiner si l'entropie pouvait être maximale.

L'idée d'une production maximale d'entropie peut sembler plus plausible, car si le système était stationnaire alors que les variables étaient à l'équilibre (valeurs tendant vers des infinis positifs ou négatifs), mathématiquement, cette entropie a pu être maximale, comme nous l'avons montré en calculant la limite de la fonction *S* représentant l'entropie quand la variable température T tend vers l'infini. La réponse obtenue était que l'entropie tendrait vers zéro.

En supposant donc que l'entropie avait été maximale au moment du big bang, on aurait du mal à soutenir par la suite qu'elle a augmenté au fil du temps. Car, à l'inverse, si la température est allée décrescendo depuis l'"explosion" du big bang, le résultat est contradictoire avec les données du modèle standard. En effet, le refroidissement de la température implique la baisse de l'entropie d'un système. Pour rappel, nous avons vu que l'entropie de Sadi Carnot et Rudolf Clausius représente la chaleur du système qui va du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid. En d'autres termes, le niveau de chaleur permet de lire le niveau d'entropie. Or, cette chaleur n'est rien d'autre que l'agitation des particules. De ce point de vue, le refroidissement progressif de l'univers devrait impliquer la baisse de son entropie, si réellement l'entropie initiale du big bang était considérée comme maximale. Mais personne ne sait précisément ce qu'elle était.

Il peut donc y avoir une erreur quand on dit que l'entropie de l'univers augmente sous prétexte que, dans le passé, l'univers a été plus chaud qu'aujourd'hui. Ce qu'on oublie est que la baisse de température peut également signifier la baisse d'entropie si on suppose qu'on soit parti d'un maximum et que l'on se dirige vers un minimum. D'où le second argument.

Le second argument pose le curieux problème d'une croissance entropique à des conditions aussi basses que la température de l'univers. Nous savons que cette température est de 2,7 Kelvin, légèrement au-dessus du zéro absolu. Si dans cette condition thermique, on soutient

l'idée d'une croissance d'entropie, ne violerait-on pas le troisième principe de thermodynamique ? En effet, le troisième principe de thermodynamique stipule que : **l'entropie d'un corps à l'état cristallin au zéro absolu (0K) est de zéro**. Il dit ensuite que, si la température d'un corps pur tend vers zéro, l'entropie du système va également tendre vers zéro. Le troisième principe de thermodynamique pose donc le problème de la diminution de la température en parallèle avec la diminution de l'entropie. Or, fort des données d'observations à l'état actuel des choses, l'univers s'est refroidi au cours de son histoire. Si on ignore la température exacte qui régnait au moment du big bang (d'une valeur très élevée tendant vers l'infini), on sait quand même que quelques 380 000 ans après le big bang, on a connu le premier rayonnement du corps noir à 3000 K soit 2726,85^{o} Celsius, comme l'atteste les données d'Arno Penzias et Robert Wilson en 1965, lors de la découverte du fond diffus cosmologique. Cette température ne fait que chuter. D'après les études, elle était de 20 K un milliard d'années après le big bang ; et au bout de 7,2 milliards d'années, elle était de 5,1 K. Aujourd'hui, elle est de 2.7 K, soit exactement -273,15^{o} Celsius. Cela prouve que la température de l'univers diminue rapidement avec son expansion. Un tel phénomène ne peut pas militer en faveur d'une croissance d'entropie, à moins de violer le troisième principe de thermodynamique. Si la température baisse comme l'indique les données, cela revient simplement à dire que l'entropie de l'univers diminue. Un tel état des choses n'est possible à admettre que lorsque l'on admet préalablement que l'univers est parti d'un point très chaud où tous les paramètres thermodynamiques étaient en équilibre thermique et, que dès lors, le système se refroidit progressivement ; ce qui l'éloigne progressivement de l'équilibre grâce aux phénomènes dissipatifs dus à des facteurs non conservatifs qui ont lieu à l'intérieur du système-univers.

Tout compte fait, par principe, il ne faut pas considérer que l'entropie croît quand il est vrai que la température baisse au fur et à mesure. Cela veut dire qu'il y a un souci réel dans le modèle standard, ce problème revient au problème de définition préalable des états initiaux et finaux de l'entropie de l'univers. Si on considère l'entropie sous le prisme de la chaleur libérée après le big bang et qui se répand avec l'expansion de l'univers, on aura l'impression qu'elle augmente en conformité avec le deuxième principe de thermodynamique[235], à savoir que l'entropie d'un système isolé augmente toujours jusqu'au seuil maximal. Mais, le principe sera

[235]Nous montrons au point 6.2.3 qu'il ne pouvait pas s'agir d'une énergie potentielle concentrée qui se disperse sinon cela aurait engendré le chaos grâce aux interactions des parties mais l'univers semble avoir gardé sa mémoire.

vite mis en difficulté, car l'univers est un système isolé atypique, c'est-à-dire sans frontières pour permettre au deuxième principe de se réaliser. En effet, les limites jouent un rôle essentiel. Elles permettent qu'il y ait une équiprobabilité de la distribution de variables intensives (chaleur, température) dans tout le système pour créer une mort thermique ou le système serait identique en toute part. Le système n'évolue plus et l'entropie est de zéro. Mais quand nous analysons le cas de l'univers, la température chute de manière drastique jusqu'à se retrouver en déca de 0°Celsius. Au lieu de voir se réaliser une mort thermique où le système n'évolue plus, on constate que le système continue son évolution jusqu'à des températures plus froides que 0°Celsius.

Pour résoudre cette énigme, il faut donc plutôt considérer la température au moment du big bang comme maximale et admettre qu'elle n'a fait que diminuer au cours de l'histoire de l'univers, passant du seuil où elle tendait vers $+\infty$ au seuil où elle tend vers le zéro absolu (une température de $-\infty$ ne voulant rien dire en physique). Nous passons donc là du deuxième principe au troisième principe qui traite de la décroissance entropique dans les conditions très froides dont la limite pour les corps purs à l'état cristallin est de -273,15. En tout état de cause, aucun thermodynamicien sérieux ne dirait qu'une entropie croît à des températures comme celles qu'on connaît de l'univers. La chaleur des étoiles est insignifiante devant le grand froid glacial de l'ensemble de l'univers. La chaleur des étoiles n'est qu'un effet qui crée des petites variations au voisinage mais sans avoir un effet considérable sur l'ensemble. Et à l'allure de l'expansion, dans quelques milliards d'années, cette température frôlerait le cap du zéro absolu. Pourrait-on encore dire que l'entropie croît toujours ?

6.2. Quelques autres principes en débats

6.2.1. Le grand thermostat universel face à la grande chaleur des étoiles : ensembles grand-canoniques et comportement entropique

Nous avons dit que les étoiles sont des sources d'énergie importantes. Elles produisent une énergie calorifique sous forme de chaleur. Ce sont les objets les plus chauds de l'univers pouvant atteindre des températures allant des millions aux milliards de degrés. C'est ce que nous pouvons lire dans ce document :

> La surface du soleil a une température d'environ 5700°C, et le cœur du soleil d'environ 15 000 000° C, bien que la température dans la couronne du soleil puisse atteindre plus de 2 000 000° C. Les étoiles naines rouges et géantes rouges ont généralement des températures de surface comprises entre 2500° C et 3500° C. Les étoiles supergéantes et hypergéantes bleues ont des

températures de surface comprises 3500º C et 35 000º C. L'explosion d'une supernova peut générer des températures supérieures à 100 000 000 000 º C.[236]

Au vu de ce qui précède, nous pouvons, de prime à bord, penser que l'univers soit un milieu chaud, auquel cas, son entropie serait en train de croître. En effet, l'entropie du feu ne peut être que croissante. Or, les étoiles sont plus que du feu : elles constituent des plasmas chauds à cause du fait que la source de bombardement qui engendre leur chaleur est interne. Nous avons dit plus haut que les plasmas chauds, dont les ions et les électrons sont chauds, s'obtiennent lorsque la source de bombardement des gaz est interne. Dans les étoiles cette source est interne. Ce sont des gaz en fusion ; c'est pourquoi elles sont essentiellement constituées de plasmas chauds. Les plasmas chauds sont obtenus à des températures très élevées de l'ordre de 11 000K. Nous pouvons lire dans l'*Encyclopédie Universalis* mis en ligne que *: « l'état plasma peut être considéré comme le quatrième état de la matière, obtenu, par exemple en portant un gaz à très haute température (10^4 K ou plus). L'énergie d'agitation thermique des molécules et des atomes constituant le gaz est alors suffisante pour qu'un électron puisse être arraché à l'une d'elle. »*[237]Cela montre que le plasma est obtenu à des hautes températures. Or, l'entropie des plasmas chauds est croissante comme, nous l'avons vu précédemment. Doit-on en déduire que l'entropie de l'univers puisse croitre sur la base de cette chaleur très élevée des étoiles ?

Nous répondons par la négative. Nous l'avons dit, l'univers est plutôt un milieu très froid en général. Nous avons déterminé sa température qui est de l'ordre de -270º Celsius, à peine seulement deux degrés au-dessus du zéro absolu. Si nous devons le décrire sous la base de l'état de la matière la plus répandue qu'est le plasma, nous dirions que l'univers baigne dans un plasma froid. Cela étant, quel est l'apport de la chaleur des étoiles ci-dessus évoquées dans le comportement de l'entropie générale ?

En tout état de cause, les étoiles et l'univers peuvent être considérés comme des ensembles grand-canoniques étudiées par Josiah Willard Gibbs. Ces ensembles sont des répliques fictives des ensembles réels, réalisées par couplages entre un ensemble fini caractérisés par un volume *V* fixé, un nombre de molécules *N* également fixé et une énergie *E*, avec un grand ensemble dont on suppose l'Energie *E,* le nombre de particules *N* et le volume *V* infinis. Le grand système est considéré comme un réservoir d'énergie, de particules ou de volume tel que, quel que

[236]https://lepetitastronaute.fr/blog/lendroit-le-plus-chaud-et-le-plus-froid-de-lunivcers/
[237] https:// www.universalis.fr

soit les échanges de particules, et d'énergie avec le petit système, l'énergie du grand système reste stable, ainsi que son nombre de particules. La chaleur des étoiles et l'univers forment donc un couplage grand-canonique tel que la chaleur des étoiles, leur masse et leur volume soient relativisés par rapport à ceux de l'univers. Ce sont là des variables qui sont trop peu de choses face au grand système-univers tout entier. **Comme dans les ensembles grand-canoniques, les étoiles échangent leur chaleur avec l'univers sans que cela change la chaleur de l'univers d'un degré Celsius**. Au contraire, la température de l'univers demeure intacte au point où l'univers peut réellement être considéré comme un réservoir de température froide. L'univers dans son ensemble subirait donc une décroissance entropique. Par contre, l'entropie locale peut être élevée au cœur et au voisinage des étoiles. En effet, dans les étoiles et dans leur voisinage où on retrouve des plasmas chauds, l'entropie devrait être élevée, en principe. Cela n'est pas surprenant, car on sait que l'entropie au voisinage de certains points dans un système quelconque peut bien croître alors que l'entropie de tout le système affiche un comportement différent. Nicolis Grégoris et Prigogine affirment : *« Par exemple, dans une petite partie d'un système macroscopique, un certain nombre de particules peuvent acquérir une grande vitesse comparée à celle que présentent leurs voisines. De la même manière, la densité des particules dans un autre faible volume peut atteindre une valeur moindre que celle du voisinage, et ainsi de suite. »*[238]Ainsi, au voisinage de certains points considérés comme des sources thermiques très importantes, on aura une entropie qui sera toujours élevée. Mais le milieu interstellaire, qui est presque vide[239](avec un atome ou moins par mètre cube), garde sa température qui est la température constante de l'univers à T = -270^{o} Celsius.

En poursuivant notre couplage, on se rendra compte que, au fur et à mesure, le système constitué par le système-étoile et le système-univers, présentera des répliques fictives ayant des copies différentes, car le système effectuera beaucoup d'échanges de matière et d'énergie avec le grand réservoir ou thermostat qui, quant à lui, demeure intacte. Cette variation dans répliques fictives de l'ensemble grand-canonique s'explique par le fait que nous sommes en présence de systèmes ouverts, bien qu'ils soient en régime stationnaire[240]. D'où les divergences observées dans les répliques fictives. Cela montre que, quel que soit le système en contact avec le réservoir, il finira par entrer en isothermie avec celui-ci au fur et à mesure que sa température chute et qu'il

[238] Grégoris Nicolis et Ilya Prigogine, *A la rencontre du complexe*, PUF, Paris, 1989, *Op.Cit*., p. 89
[239] Nous reviendrons sur le vide *intergalactique et interstellaire* au point 6.2.2
[240] Le régime stationnaire signifie ici que la quantité de matière qui entre est la même qui ressort.

cède ses particules au grand système. Le couplage de ces systèmes composés d'une étoile et de son environnement permettra d'étudier la variation d'enthalpie H de l'étoile. Le constat évident qu'on pourra en faire est qu'on aura une réaction chimique exothermique ou alors une transformation physique exothermique. Car l'énergie totale du système va varier au cours de la transformation dans un sens privilégié de l'intérieur du petit système vers l'extérieur.

En effet, appelons Q_P la chaleur dégagée par l'étoile. Sachant par ailleurs que la chaleur va toujours du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid, conformément au deuxième principe de thermodynamique, Q_P ira du petit système vers le grand système jusqu'à ce que l'on atteigne la situation d'isothermie où la température sera identique dans les deux systèmes couplés. Pour rappel, l'enthalpie Q_P correspond à la quantité de chaleur qu'un système doit dégager (en cas de transformation exothermique) ou alors la quantité de chaleur qu'il doit absorber (en cas de transformation endothermique) pour être à température constante. Cela dit, Q_P aura un sens privilégié dans le couplage entre le système-étoile et l'univers, tel que cela est illustré dans la figure ci-dessus.

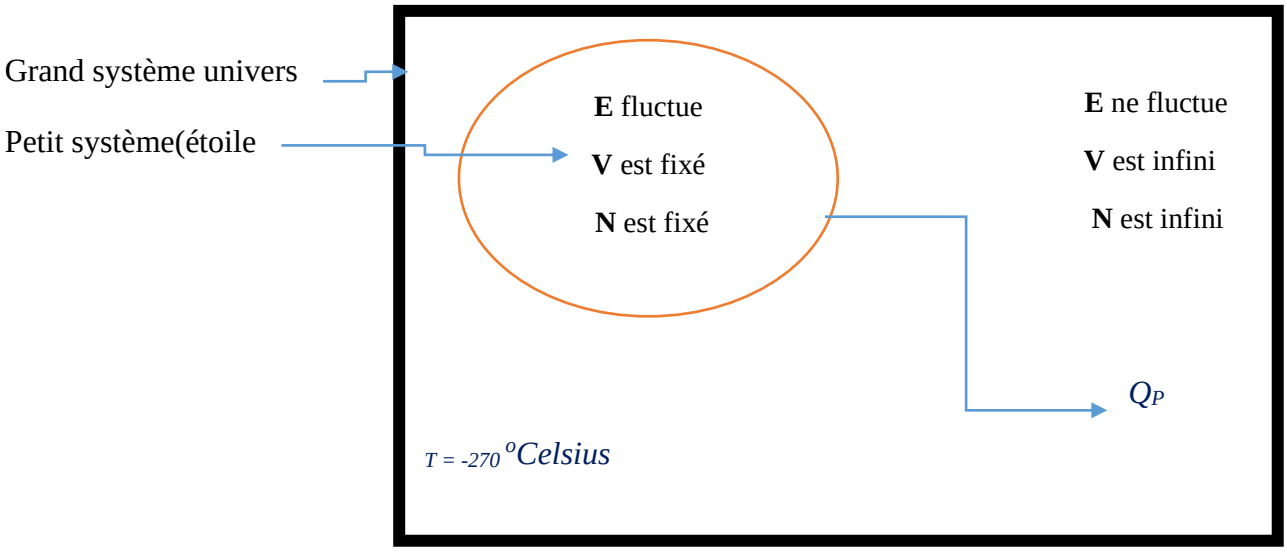


Figure 18 : illustration repésentant les échanges entre le grand système (l'univers) et un petit système (une étoile) formant un ensemble grand-canonique

La figure ci-dessus illustre le fait que l'énergie E du petit système fluctue au fur et à mesure qu'il cède sa chaleur au grand système. Par contre, les variables extensives et intensives du grand système ne varient pas. La température reste donc égale à -270º Celsius quels que soient les échanges effectués. Ces variables du grand système restent constantes à cause du fait que le grand système se comporte comme un thermostat naturel. Nous allons essayer de déterminer l'enthalpie d'un tel couplage pour parvenir à l'isothermie conformément au premier principe de thermodynamique à savoir : dans un système thermodynamique, la température est la même. Nous savons donc, par avance, qu'au bout d'un certain temps, la situation qui doit arriver est celle d'isothermie.

Nous savons que la variation d'enthalpie est donnée par la formule $\Delta H=\Delta U+ P\Delta V$. Nous savons aussi que l'énergie interne n'est pas facile à déterminer contrairement à la relation pression-volume qui peut être mesurée expérimentalement. C'est ce que nous pouvons lire dans Wikipédia *« Cependant, il est difficile de déterminer expérimentalement l'énergie interne d'une substance. »*[241]En effet, le calcul de l'énergie interne demande d'identifier toutes les formes d'énergies possiblement agissantes. Par contre, nous pouvons bien mesurer la chaleur notée $Q_P$qui correspond à la quantité de chaleur absorbée ou rejetée. Alors, on écrira : $\Delta H= Q_{P=} \Delta U+ P\Delta V$. Donc la variation enthalpie peut simplement s'écrire $\Delta H= Q_{P.}$ Il y aura donc un transfert thermique du système formé par l'étoile vers l'environnement considéré comme le grand système, par convection. La convection est un phénomène de transfert thermique qui se produit dans les situations gazeuses ou en présence de liquide lorsqu' il y a une différence de température entre deux parties d'un ensemble. La chaleur se déplacera donc de la partie réchauffée par la source thermique de l'étoile vers la partie froide. Avec la possibilité de former des petites bulles appelées les cellules de Bénard du nom de celui qui découvrit le principe. Prigogine nous dit à propos que :

> Les mouvements d'ensemble des fluides (liquide ou gaz) [sont] créés par l'hétérogénéité de la température et connus sous le nom de convection thermique […] Sans prendre en compte les nombreuses applications techniques, la convection est à la base de nombreux phénomènes importants et spectaculaires sur notre planète […] A une grande échelle distance de nous, la convection est à la base des transferts de chaleur et de matière dans le soleil. […] L'expérience simple suivante, réalisée pour la première fois en 1900 par le physicien français Bénard, conduit à un nombre de propriétés étonnantes.[242]

[241] www.allopropf.qc.ca.chimie

[242]Grégoris Nicolis et Ilya Prigogine, *A la rencontre du complexe*, PUF, Paris, 1989,*Op.Cit.*, p. 13.

Les cellules de Bénard apparaissent à cause de la forte différence de température obtenue dans le couplage de nos deux systèmes, et surtout à cause du fait que l'étoile constitue une source thermique importante qui fait constamment varier sa température ΔT. Mais, comme nous pouvons le visualiser dans la figure ci-dessus, toute cette chaleur $Q_P$sera transférée au grand système. Les implications sont les suivantes.

- La température du grand système n'est pas affectée pour la simple raison que celui-ci est un réservoir de température. La température du grand système est constante malgré la chaleur Q_P absorbée.
- Le petit système-étoile finira par se mettre à température constante (T = -270^o Celsius) avec le grand système -univers quand il aura épuisé sa source de combustion.

De ce qui précède, nous pouvons dire que l'entropie de l'univers est négative, car une température froide indique toujours une production d'entropie négative, surtout une température extrême qui frôle le zéro absolu. Il importe aussi de noter que la chaleur très élevée des étoiles est insignifiante face à l'environnement extérieur (l'univers) qui se comporte comme un thermostat naturel. L'entropie locale peut donc quelques fois augmenter au voisinage d'une étoile, mais l'entropie générale du grand système reste toujours basse pour la simple raison que le grand système absorbe la chaleur des petits systèmes locaux sans varier ni de température ni de masse. On peut noter, en dernier lieu, que la production de chaleur d'une étoile étant limitée dans le temps (on peut calculer la durée de vie qui reste à une étoile), chaque étoile finira par épuiser ses ressources (à savoir l'*hydrogène et l'hélium* [243]qui constituent majoritairement le carburant d'une étoile et la matière dont elle est formée), et finira par s'éteindre. La température retrouvera la température ambiante de l'univers, c'est-à-dire que le système-étoile se mettra à température constante. La production d'entropie ne pourra qu'être négative.

[243]Chaque étoile est en fait une source thermique importante. Cela est dû à la réaction nucléaire de fusion qui a lieu dans le cœur de l'étoile : deux atomes d'hydrogène fusionnent pour donner lieu à un atome d'hélium tout en émettant de la lumière et de la chaleur.

6.2.2. Le principe cosmologique d'isotropie face à la dissymétrie de la matière et les implications entropiques

Les principes cosmologiques sont des principes fondamentaux de la cosmologie scientifique, ou bien leurs corollaires. Ils sont issus de la théorie de la relativité d'Einstein. Ces principes sont incontournables dans le modèle standard de la cosmologie qui se base sur les travaux d'Einstein et la théorie de big bang. Sylvain Fouquet et François Hammer affirment :

> D'après la relativité générale d'Einstein, pour connaître parfaitement le continuum espace-temps, il faut prendre en compte la distribution du couple masse-énergie de l'univers : la position de chaque atome, leur vitesse ainsi que la position des photons avec leur énergie propre. C'est évidemment impossible en pratique, il faut alors faire les bonnes simplifications pour décrire la distribution d'énergie de l'univers et être ainsi capable de résoudre l'équation d'Einstein et d'accéder au continuum espace-temps de l'Univers. Ces simplifications sont définies sous le terme de "principes cosmologiques" ; ce sont des postulats caractérisant les propriétés de l'univers. En utilisant les données observationnelles de la distribution de la matière dans l'univers de la fin du XXe siècle jusqu'à nos jours, on s'aperçoit que ces principes tendent à être vérifiés dans la partie de l'univers observable[244]

Parmi les principes cosmologiques les plus usuels, on peut citer le principe d'isotropie. Que signifie réellement ce principe ? L'isotropie correspond à un espace dépourvu d'aspérités dont les propriétés sont invariables, homogènes, et où les mouvements pourraient prendre n'importe quelle direction. Dans un texte commis par le *Centre National de Ressources textuelles et lexicales*, nous pouvons lire que le mot *isotrope* désigne un espace ou un milieu *« qui présente donc les mêmes caractéristiques physiques dans toutes les directions. »*[245] Parlant de ces principes cosmologiques, ils sont au nombre de deux à savoir : le principe d'équivalence temporelle et le principe d'isotropie. Expliquant toujours ce principe, Sylvain Fouquet et François Hammer poursuivent en disant que *« Les premiers principes de cosmologie concernent le caractère spatial de l'univers. Il est supposé isotrope et homogène. Cela signifie que l'univers n'a pas de direction privilégiée, il est le même quelle que soit la direction dans laquelle on le regarde. De plus, il n'a pas de position privilégiée, il est le même quel que soit l'endroit où l'on se trouve. »*[246]Nous partons donc sur la base d'un univers homogène et isotrope tel qu'il présente les mêmes lois physiques quelle que soit la direction où on regarde. Cela étant, l'entropie de l'univers serait également le même. Or, il se passe que le principe d'isotropie ne soit pas tout à

[244]Sylvain Fouquet, François Hammer, *Les principes cosmologiques parus dans UFE l'observatoire de Paris* **in**https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_cosmologie/impression.html
[245] https://www.cnrtl.fr
[246]Sylvain Fouquet et François Hammer, *Idem.*

fait vérifié. L'univers ne saurait être homogène et identique dans toutes les directions. C'est pourquoi, en énonçant ce principe cosmologique, on parle de la simplification des lois de la relativité générale d'Einstein qui demande à connaître avec exactitude un certain nombre de détails sensibles telle que la distribution du couple masse-énergie de l'univers (la position de chaque atome, leur vitesse ainsi que la position des photons avec leur énergie propre). La simplification de ces détails a permis de penser que l'univers est isotrope. Nous allons étudier quelques raisons qui sapent ce postulat montrant un univers dissymétrique avec une entropie dissymétrique :

- L'inégale distribution de la matière

Il paraît évident que la matière (la matière baryonique, celle que l'on connait sous forme d'atomes) ne soit pas également répartie. La distribution du nombre d'atomes par mètre cube dans le milieu interstellaire et intergalactique varie. Si la densité moyenne est d'un atome par centimètre cube dans le milieu interstellaire, cette quantité peut être revue à la hausse dans les étoiles et les planètes, ou à la baisse dans le milieu intergalactique. Dans les étoiles et les planètes, la présence de la matière est abondante, pouvant atteindre des millions de milliards par centimètre cube. Par exemple, un centimètre d'air sur la terre contient $N = 6{,}02x10^{19}$. Cela dit, la matière est inégalement répartie. En dehors de l'espace interstellaire qui présente souvent des densités critiques d'un atome par centimètre, il y a aussi les vides cosmiques avec moins du dixième d'un atome, qui représentent pourtant les 90% de l'espace connu. Nous pouvons lire ce qui suit dans Wikipédia, dans une réflexion d'astrophysique consacrée au *videintergalactique* :

> Les vides cosmiques sont donc de vastes espaces entre les filaments galactiques, contenant très peu ou pas de galaxies. Les vides ont généralement un diamètre de de 10 à 100 mégaparsecs. Les vides ont moins d'un dixième de la matière considérée comme typique pour l'univers observable […] Les vides ont des tailles typiques de centaine de millions d'années-lumière et occupent environ 90%de l'espace connu[247].

De ce qui précède, il est évident que la quantité de matière est loin d'être également distribuée dans tout l'univers. Cela est une évidence inconstatable. Il y a des zones de forte densité et des zones de basse densité. Or, nous savons que l'entropie d'un système dépend bien de la densité, à savoir le nombre de particules par mètre cube. Puisque l'entropie mesure le degré de désordre d'un système, la concentration ou alors de la densité élevée va correspondre à une entropie faible, c'est-à-dire que la matière a moins de possibilités de se retrouver dans un état

[247]Wikipédia, *Le vide galactique, ce néant mystérieux et omniprésent dans l'univers* in https : // dailygeekshow.com

désordonné à cause de son caractère compacte. Ainsi, le manque de concentration correspondra à une entropie élevée. Cela revient à ce que nous avons déjà dit, à savoir : l'entropie des solides est plus faible que celle des liquides à cause de la forte concentration de la matière dans les solides ; celle des liquides est plus faible que celle des gaz. Moins il y a de la concentration, plus l'entropie est élevée. L'inégale distribution de la matière dans l'univers implique donc que l'entropie soit basse là où il y a plus de densité, et qu'elle soit élevée là où la densité est faible

En effet, l'univers ne peut réellement être homogène et isotrope que lorsque qu'on a procédé par simplification des principes et des lois qui régissent le comportement de la matière et celui du continuum spatio-temporel. On dira par exemple que la densité de la matière dans l'univers est d'un atome par mètre cube alors qu'on retrouve des espaces où elle est un peu moins ou alors supérieure à ce seuil de densité critique. De même, on peut dire que l'entropie de l'univers n'est homogène et identique que par ces mêmes simplifications. Car, comme nous l'avons vu, l'entropie dépend tout aussi du rapport masse-densité ou densité massique. Une densité plus élevée implique une entropie faible tandis que qu'une densité faible impliquera une entropie élevée. Et tout cela aura une implication sur la courbure de l'espace-temps. Car, la relativité générale d'Einstein traduite de façon littérale stipule que : la matière dit à l'espace comment il doit se courber et au temps comment il doit ralentir et l'espace dit à la matière comment elle dit se mouvoir. Une différence de matière implique des courbures spatio-temporelles différentes. On peut lire sur le site futura-sciences ce qui suit :

> En cosmologie relativiste, on introduit un paramètre Ω_0 qui est le rapport de la densité d'énergie mesurée dans l'univers observable et de la densité critique dans le cadre des univers homogènes et isotropes. Lorsque la densité est supérieure à la densité critique ($\Omega_0 > 1$), la géométrie spatiale de l'univers observable est celle d'une sphère. Lorsque $\Omega_0 < 1$, on est en présence d'un univers ouvert, et lorsque $\Omega_0 = 1$, la géométrie spatiale est plate.[248]

Ainsi, en fonction de la densité locale, relativement à la densité critique, on aura les courbures suivantes :

[248] *Définition de la densité critique* prise dans htpps:// www.futura-sciences.com du 20/01/2003

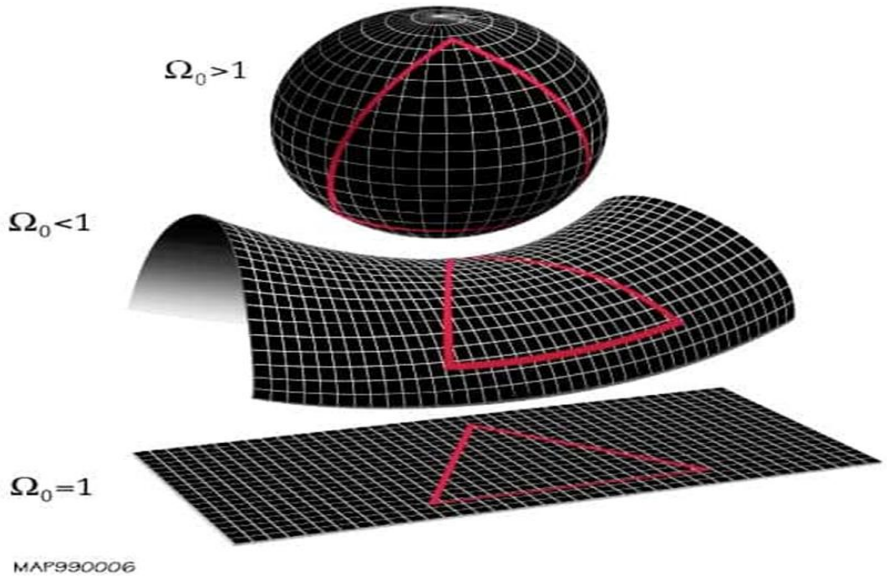


Figure 19 : illustration de la courbure de l'espace-temps en fonction de la densité de la matière montrant que l'univers n'est pas isotrope, mais courbé en fonction de la densité de matière

- L'inégale répartition de la température

Le deuxième aspect en opposition de phase avec un univers isotrope et homogène, en dehors de l'inégale distribution de la matière dans l'univers, est l'inégale distribution de la température. Nous avons vu précédemment que la température n'est pas également répartie dans l'univers. Si l'univers en un milieu très froid à -270^{o} Celsius, on retrouve également des zones plus froides que cette température ambiante Par exemple, la zone la plus froide de l'univers est le *cold point* dont la température est inférieure à celle du fond diffus cosmologique. A côté de cela, il y a des zones très chaudes comme le cœur des étoiles voire leur surface et leur voisinage qui peuvent atteindre des milliers de milliards de Kelvin, comme l'illustre une étude réalisée en 2016 sur le *quasar 3C273*. Cette étude a évalué son plasma à une température d'environ 10 000 milliards de Kelvin (environ 10 000 milliards de degrés Celsius). Cela montre à suffisance que la température est inégalement répartie dans l'univers. Cela étant, l'univers n'est pas isotrope et identique dans toutes les directions. On ne saurait se promener indifféremment dans toutes ses directions sans que les sensations ne soient affectées. Les zones chaudes rayonnent la chaleur tandis que les zones froides rayonnent le froid qui est une chaleur de très bas rayonnement. Or, la température est le principal indicateur du comportement l'entropie. Car, on sait que, plus le corps

est froid, plus son entropie est basse. L'entropie des zones les plus froides est théoriquement plus basse que celle du reste de l'univers. Dans l'atmosphère terrestre, la température ambiante est de 12° Celsius. L'entropie sur la terre donc a tendance à être croissante, dans la mesure où on considère la terre comme un système ouvert qui reçoit la chaleur venant du soleil. On peut écrire l'équation de son entropie comme il suit : $\mathbf{S_{totale} = S_{sys}+S_{ext} \geq 0.}$ La lune, puisqu'elle ne dispose pas d'atmosphère, a une température ambiante -23 degrés avec des pics de 123 degrés Celsius le jour à certains endroits et de -233 degrés Celsisus la nuit au niveau des cratères. L'*Agence Spatiale Canadienne* décrit les températures de la lune comme il suit : *« 23 degrés Celsius est la température moyenne sur la lune. Lorsque les rayons du Soleil frappent la surface de la lune, la température grimpe jusqu'à 123 degrés Celsius, mais la nuit, elle descend jusqu' à moins de 233degrés Celsius. »*[249]La lune agit comme un corps solide incompressible et indilatable dont l'entropie se calcule comme il suit : $\Delta S = mc.\ln(\frac{T}{To})+S_o$, avec So=S(To) l'entropie de la phase incompréhensible et indilatable dans l'état (T_o, P_o et V_o) choisi comme origine et *c* la capacité thermique massique supposée indépendante de la température. Ainsi, l'entropie de la lune, contrairement à celle de la terre, va considérablement varier à cause de l'inégale distribution de la température pendant le jour et pendant la nuit. L'inégale répartition de la température influence donc considérablement le comportement de l'entropie, montrant que l'univers n'est pas isotrope et que son entropie est dissymétrique

6.2.3. Le débat sur une *éventuelle énergie potentielle* de l'univers.

Partant d'une réflexion simple sur les systèmes thermodynamiques, l'on ne peut pas passer outre la question voire le rôle de l'énergie potentielle. C'est une forme d'énergie importante dans les systèmes mécaniques. L'énergie potentielle dans un système est une énergie disponible généralement concentrée en un point et qui se dissout dans l'ensemble du système sous forme d'énergie cinétique. On parle encore d'énergie stockée dans tout objet ou système en raison de sa position ou de la disposition de ses pièces. L'énergie potentielle fait appel à l'énergie cinétique à travers laquelle elle se dissout. Les deux énergies (potentielle et cinétique) forment l'énergie mécanique du système. Au niveau microscopique, l'énergie potentielle se lit à travers la capacité qu'ont les particules d'effectuer des mouvements et d'entrer en interactions. Cette énergie peut être exprimée sous la forme d'une force conservative si son travail dépend

[249] Agence Spatiale canadienne in https://www.asc-csa.gc.ca

uniquement du chemin suivi et n'est pas transformé en une énergie autre que l'énergie mécanique. Dans le cas contraire, la force est dissipative. Wikipédia précise :

> Une force est dite conservative lorsque le travail produit par cette force est indépendant du chemin suivi par son point d'action. Dans le cas contraire, la force est dite non conservative. Les forces conservatives possèdent trois propriétés remarquables :
>
> - Une force conservative dérive d'une énergie potentielle :
> - Le travail exercé par la force est égal à l'opposé de la variation de l'énergie potentielle :
> - L'énergie mécanique d'un système, somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle, soumis uniquement à l'action de forces conservatives est conservée : $\Delta E m = 0$; l'énergie potentielle est convertie en énergie cinétique[250].

Cela dit, en cinématique, l'énergie mécanique d'une force conservative se conserve. On aura : $E_m = E_p + E_c$, Et dans ce cas, l'énergie potentielle E_p est opposée à l'énergie cinétique E_c. Donc, $E_p = - E_c$.

En thermodynamique microscopique, la transformation de l'énergie potentielle en énergie cinétique augmente le chaos du système jusqu'au seuil chaotique maximal où toute l'énergie potentielle est complètement transformée en énergie cinétique incapable de maintenir une activité dans le système. Un système conservatif qui a complètement cédé son énergie potentielle en énergie cinétique est un système en équilibre thermique tel que ses variables thermodynamiques sont reparties de façon égale dans l'ensemble du système. Alors, il se trouve réalisée la mort thermique qui correspond au seuil chaotique maximal ($S \geq 0$).

C'est cette approche thermodynamique, à partir de l'énergie potentielle qui a motivé les thermodynamiciens classiques, à savoir Boltzmann et les autres, à croire que l'univers entrerait dans une phase de mort thermique après que son énergie potentielle soit totalement épuisée. L'univers passerait alors à une phase d'équilibre thermique à température très basse. Ernest Rossi décrit l'angoisse éprouvée par Boltzmann, ce thermodynamicien rongé par la fatalité de la mort thermique de l'univers par épuisement de son énergie potentielle :

> Alors que l'équation de Boltzmann menait à d'excellentes prévisions sur la manière dont les systèmes mécaniques évoluaient, elle aboutit sous sa forme originelle à une conclusion plutôt triste sur la "mort thermique" certaine de l'univers. La deuxième loi de la thermodynamique déclare que l'entropie doit toujours augmenter et l'équation de Boltzmann identifie cette entropie croissante avec une probabilité croissante de désordre moléculaire. Cette vision de l'univers physique du dix-neuvième a fait croire que la matière allait vers un désordre croissant accompagné d'une perte d'énergie inéluctable (la "mort thermique") dans l'univers (...) Triste ironie de l'histoire : bien qu'il ait essayé de formuler la

[250]https://fr.wikipedia.org/wiki/Force_conservative

> dynamique de l'évolution de la matière, les idées de Boltzmann ont semblé plutôt avoir l'effet contraire et diriger la pensée vers la vision d'une dissolution finale de l'univers.[251]

Cette situation où l'énergie potentielle est complètement changée en énergie cinétique inutile et incapable d'impulser du mouvement à la matière se nommera plus tard le *bill chill* (le grand froid de la mort thermique) en opposition avec le big bang (soit la chaleur originelle concentrée en un seul point). La théorie du big crunch suppose donc que, à partir de là, l'énergie potentielle ne travaillant plus, c'est-à-dire étant complètement transformée en énergie cinétique inutile, il ne restera plus que la force gravitationnelle qui travaillera à l'effet de ramener toute la matière en un seul point. Nous lisons dans *Wikipédia* que :

> En cosmologie, le *Big Crunch* ou effondrement terminal est un des possibles destins de l'Univers. Il désigne l'effondrement de l'Univers, c'est-à-dire une phase de contraction faisant suite à la phase d'expansion. C'est donc en quelque sorte un « *Big Bang* à l'envers », qui consiste à ramener le cosmos à un point de singularité d'origine annulant l'espace et le temps. Vers la fin de cet effondrement, l'Univers atteint une densité et une température gigantesques. Ce scénario cosmologique se produit selon les propriétés du contenu matériel de l'Univers, en particulier les valeurs relatives de sa densité d'énergie et de sa densité critique.[252]

Nous pensons que cette situation risque de ne pas se produire. Ni le big chill, ni le big crunch ne sont possibles à la lumière de la thèse d'un univers à entropie décroissante. En effet, l'univers ne serait pas le fruit d'une explosion originelle qui agit comme une énergie potentielle dispersant la matière dans l'espace-temps jusqu'à l'épuisement total de la force d'explosion (énergie potentielle) et engendrant le chaos de la matière dans tout l'univers jusqu'à un seuil maximal appelé big chill. Tout compte fait, l'énergie potentielle, puisqu'elle est une énergie qui crée des interactions, engendre toujours le chaos grâce aux chocs et aux entrechocs. Au contraire, l'univers est ordonné du point de vue macroscopique. Quand on regarde l'univers actuel et ses différentes parties, on a l'impression qu'on peut facilement les emboiter les unes dans les autres et reconstituer toute son histoire, comme s'il s'était dilaté en restant ordonné sans entrer à l'état de chaos. Les systèmes qui ne gardent pas généralement leur mémoire sont des systèmes instables et très chaotiques. En ce qui concerne l'univers, il se dilate plutôt par la force d'une force répulsive, à savoir l'énergie noire. L'univers n'est donc pas poussé par une énergie potentielle originelle qui aurait créé une déflagration aux effets chaotiques. Sinon, les différentes parties de l'univers seraient toujours entrain de se heurter avant d'atteindre un supposé équilibre thermique.

[251]Ernest Rossi, *Qu'est-ce que la vie ? L'évolution de l'information du flux quantique au Soi*, Perspectives psychologiques, n^0 26, p 6-22, 1992.
[252] https://fr.wikipedia.org/wiki/Big_Crunch

Si l'énergie potentielle de l'univers n'a donc pas de sens puisqu'il se dilate depuis le big bang sous la poussé de l'énergie noire, on peut aboutir à la conclusion que l'univers est ordonné et que ses différentes parties peuvent s'emboîter. Son entropie ne peut donc pas croitre si nous prenons l'entropie comme mesure du désordre. On peut plutôt dire que l'univers présente de plus en plus de configurations ordonnées sans que ces configurations entrent en collisions et en interactions mutuelles pour engendrer le chaos. Dès lors, on se demandera plus où est passée l'énergie potentielle de l'univers, car le big bang n'aurait pas été à une explosion comme on pourrait le croire, à partir de son onomatopée de son nom. A ce propos, nous précisons, que le nom big bang a été forgé par les partisans du modèle cosmologique de l'état stationnaire qui soutenaient la thèse d'un univers statique et sans origine. C'était pour railler les partisans de la théorie de l'atome primitif qu'ils ont utilisé cette onomatopée « big bang » pour décrire une grande explosion subite et inexpliquée. A propos, on peut lire dans futura-sciences que :

> [Le big bang], terme inventé dans les années 1950 (au cours d'un programme de la BBC) par l'astrophysicien anglais Fred Hoyle pour désigner avec ironie le concept "d'explosion originelle" introduit dans le modèle cosmologique initialement développé dans les années 1920 par l'astrophysicien belge Georges Lemaître et le physicien russe Alexander Friedmann[253].

Cependant, une explication approfondie ne voit pas en la théorie du big bang une simple explosion pour les raisons que nous avons soulevées. La théorie du big bang est une théorie expansionniste de l'univers. Parti d'un point initial très chaud et très dense, l'univers se dilate, s'étire et devient de plus en plus géant. Wikipédia affirme que *« The big bang is a physical theory that describes how the univers expanded from an intial state of high density and temperature »*[254]. La théorie d'un big bang ne table donc pas nécessairement sur une explosion. Ce qui serait contraire aux observations, mais elle nous décrit le point initial à partir duquel l'expansion a commencé. Pour George Lemaître, il s'agit plutôt d'un atome originel qui s'est dilaté au fil du temps et sous l'effet d'une force de répulsion qui agit en opposition à la gravité, tout en l'emportant sur cette dernière. Si on prend pour point de départ un univers qui soit parti d'un point initial chaud et dense et qui gonfle au fur et à mesure en engendrant l'espace-temps, on aboutit à la conclusion que l'univers n'est pas mu par une énergie potentielle. Il est un système qui se détend de façon ordonnée tout en se refroidissant au fur que sa température chute, entraînant nécessairement une diminution d'entropie. Si les variables thermodynamiques étaient à

[253]https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/univers-big-bang-858/
[254] https://en.wikipedia.org/wiki/Big_Bang

l’équilibre dans l’atome primitif avec des valeurs de température très proches très élevées, l’entropie aurait tendu vers zéro, tel que nous l’avons montré au chapitre (5.2.1). Dès lors, avec l’expansion et le refroidissement, elle connait une courbe descendante en mesure que la température baisse au point de frôler aujourd’hui le cap du zéro absolu. Il n’a donc certainement été question d’une énergie potentielle de l’univers qui aurait dispersé toutes les parties de l’univers comme une bombe, sinon l’univers serait invivable avec les interactions, les chocs et les entrechocs de toutes sortes, à n’en pas finir, au point de ne pas pouvoir reconstituer son histoire. Un système chaotique ne peut pas voir son histoire reconstituée car les interactions engendrent des trajectoires aléatoires et stochastiques qui ne permettent ni de prédire ni de retrodire.

CONCLUSION PARTIELLE

Après ce long et riche périple gnoséologique qui a consisté à interroger le principe d'une croissance de l'entropie de l'univers dans sa globalité, en partant non seulement du deuxième principe qui semblait un acquis vis-à-vis de l'univers, nos réflexions ont porté, en premier lieu, sur les apories, les obstacles méthodologiques, les erreurs épistémologiques liées à une telle vision des choses. Nous nous sommes attelés à montrer, en conformité avec la première partie de notre travail qui faisait une précision sur l'interprétation statistique du second principe, que l'entropie d'un système isolé ne croît pas absolument, mais pourrait seulement croître. Prenant le cas de l'univers, nous avons montré qu'il échappe aux catégories connues et qu'il serait plutôt un cas *suis generis*. Aucun modèle thermodynamique ne pourrait donc rigoureusement s'appliquer à lui. Mais, si nous voulions à tout prix le ranger quelque part, nous pourrions dire, dans une moindre mesure, qu'il est un système isolé atypique. Dès lors, la réflexion a été relancée. Non seulement l'entropie d'un système isolé ne croît pas toujours, mais l'univers est un système isolé atypique. Notre réflexion nous a donc permis de voir que l'entropie générale de l'univers ne serait pas ce qu'affirme le modèle standard. Beaucoup d'argument ont été évoqués les plus récurrents étant la température très basse de l'univers (-270^{o}C) car la température est la variable fondamentale en thermodynamique. Cela dit, la troisième partie nous permettra de formuler une nouvelle grille d'intelligibilité de l'entropie tant locale qu'universelle en physique.

TROISIEME PARTIE :
DE LA RUPTURE EPISTEMOLOGIQUE À LA CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PARADIGME ENTROPIQUE

INTRODUCTION PARTIELLE

Nous avons montré précédemment les difficultés que l'on rencontre par rapport au système thermodynamique géant qu'est l'univers. Sa thermodynamique reste quelque peu une *quaestio disputata*. Mais, partant d'un certain nombre de paramètres observables à notre échelle, bien sûr, nous sommes arrivés à la conclusion d'une entropie décroissante, contrairement aux données du modèle cosmologique standard. Car les principes et les lois qui sous-tendaient la théorie d'une entropie croissante de l'univers ont été mis en difficulté. La présente et dernière partie est le lieu de la rupture épistémologique et de la construction d'une nouvelle grille paradigmatique du comportement entropique à tous les niveaux, à savoir le niveau local et le niveau général. Il s'agit de redéfinir le cadre opératoire du second principe et celui du troisième principe qui constituent la clé de lecture de l'entropie, le premier pour les systèmes locaux et le dernier pour le système thermodynamique géant (l'univers). La suite nous permettra de mettre l'entropie en rapport avec les questions de soutenabilité écologique et les questions existentielles, à l'effet de voir son importance dans le cadre de la destinée humaine et les perspectives à venir de la vie.

CHAPITRE 7 : LA DÉCROISSANCE RETROUVÉE OU RÉECRITURE DU NOUVEAU MODÈLE.

Ce chapitre est capital dans la mesure où il constitue le tournant décisif qui nous permet de nous orienter par rapport au problème général qui est posé dans ce travail, à savoir : le rôle de l'entropie en thermodynamique. Il s'agit de déterminer le comportement de l'entropie dans un système thermodynamique quelconque, avec une inférence sur l'entropie de l'univers. C'est à partir de ce chapitre que beaucoup de choses se décideront, à l'issue de ce travail. Les autres chapitres qui suivront nous permettront simplement de capitaliser les nouvelles trouvailles scientifiques, et de réactualiser certains débats sur la base de ces mêmes trouvailles. Nous diviserons notre réflexion en deux articulations : les considérations entropiques à l'échelle locale et celles à l'échelle globale. Fort de tout cela, nous construirons la nouvelle grille d'intelligibilité avec en toile de fond la question suivante : sur la base de quel principe réécrire le comportement des entropies locales et de l'entropie universelle ?

7.1. Deuxième principe et réécriture des entropies locales

7.1.1. De la croissance entropique et de la mort thermique

A l'échelle locale, nous nous proposons de réécrire l'entropie à partir du deuxième principe de thermodynamique, que ce soit pour la croissance de l'entropie que pour sa décroissance. Cela dit, d'après le deuxième principe de thermodynamique, il est possible d'assister, selon les cas, à deux situations possibles, à savoir : une croissance ou une décroissance de l'entropie. Aussi pouvons-nous avoir affaire à deux principaux cas : la croissance entropique dans les systèmes isolés qui est un phénomène très probable statistiquement, et la croissance entropique dans les systèmes ouverts et fermés. Les deux situations évoluent vers la mort thermique qui correspond à une situation où les variables d'état intensives sont parvenues à l'équilibre thermique. Commençons donc par le premier cas, à savoir la croissance entropique dans les systèmes isolés.

Le deuxième principe de thermodynamique nous a habitués à la croissance entropique dans un système isolé, tel que cela a été énoncé par Rudolf Clausius qui avait défini le comportement entropique dans un système isolé comme étant toujours croissant jusqu'au seuil

d'entropie maximale ($S \geq 0$). La production d'entropie dans ces cas est supérieure ou égale à zéro. On écrit alors $S_{crée} \geq 0$. Nous savons aussi que le système isolé, qui est système présentant des frontières adiabatiques, ne reçoit ni de chaleur ni de matière venant de l'environnement. Son entropie reçue est, par conséquent, nulle. Alors, il ne peut présenter qu'une entropie créée qui évolue jusqu'au seuil maximal. Le théorème des fluctuations nous a appris, par ailleurs, que cette croissance était davantage statistique à telle enseigne qu'il est plus juste de dire que l'entropie d'un système isolé **peut** croître jusqu'au seuil d'entropie maximale tel que l'énonce le second principe, sans que cela soit une nécessité. Nous avons détaillé toutes ces complexités au chapitre 2.2.2

De façon générale, nous pouvons donc dire que les systèmes locaux peuvent présenter des entropies croissantes. Ces systèmes sont des systèmes qui évoluent vers la mort thermique, et l'entropie ici joue un rôle destructif. Le rôle destructif de l'entropie correspond au fait que le système passe d'un état organisé à un état chaotique où la matière est dans une situation de *scattering*, toutes choses qui engendrent le chaos. En d'autres termes, la matière évolue dans un état de plus en plus désorganisé jusqu'au ce que la température puisse être répartie de façon égale dans tout l'ensemble du système. Pour rappel, le principe stipule que : *L'entropie d'un système isolé ne peut pas diminuer. L'entropie croît jusqu'à ce que le système atteigne l'équilibre ou si le système est déjà à l'équilibre, l'entropie reste constante.*

Le réel problème est qu'il est très difficile de rencontrer un vrai système isolé dans la réalité physique. Les systèmes isolés peuvent, néanmoins, être obtenus avec des approximations dans les laboratoires. C'est pourquoi on estime que ces systèmes sont des idéalisations, car un vrai système isolé n'existe pas. Quel que soit le niveau de précision des outils utilisés, on ne peut pas isoler un système thermodynamique, on ne peut que le considérer comme étant isolé par simplification et par approximation. Yi Fang Chang nous disait déjà, à propos de l'idéalisation de ces systèmes, que « *such preconditions of entropy increase are: for an isolated systems, which are only approximation [etc.] »*[255]Il dit en quelque sorte qu'il faut des préconditions pour pouvoir observer l'entropie croître dans un système isolé. Quoi qu'il en soit, le plus important ici est de savoir que, théoriquement, l'entropie d'un système isolé local peut présenter une évolution croissante même s'il est admis que le système isolé est une idéalisation théorique ou alors un

[255]Yi Fang Chang, *Entropy decrease in isolated systems: theory, facts and test,Op. Cit*. p.16-24

dispositif de laboratoire isolé sur la base de la négligence d'un certain nombre de paramètres non pris en compte de façon consensuelle.

Le deuxième cas de croissance entropique est le cas des systèmes ouverts et fermés que nous pouvons traiter ensemble. La seule différence majeure entre les deux types est que les systèmes ouverts échangent la matière et la chaleur, tandis que les systèmes fermés échangent seulement la chaleur avec leur environnement. Ce type de systèmes peut voir son entropie évoluer au cours du temps, en rapport avec les conditions et les contraintes imposées par l'environnement. Dans le cas où l'entropie venant de l'extérieur est supérieure à l'entropie du système, le bilan entropique montrera une croissance de l'entropie, puisque le système va recevoir la chaleur venant de l'environnement, conformément à l'énoncé du deuxième principe qui stipule que la chaleur va toujours de milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid. Le système verra donc son entropie croître jusqu'au seuil maximal où se trouve réalisée une égale répartition de la température dans les deux systèmes. On pourra donc écrire : $\mathbf{S = S_{syst} + S_{env} \geq 0.}$

Pour nous résumer sur les deux cas évoqués dans ce premier point, à savoir la croissance entropique dans les systèmes thermodynamiques isolés, ouverts et fermés, nous pouvons dire que les cas de croissance entropique dans les systèmes ouverts représentent une grande probabilité dans la nature. Pour la thermodynamique traditionnelle, celle énoncée par les pionniers, la croissance entropique en rapport avec le deuxième principe de thermodynamique était une règle d'or. Ainsi, pendant longtemps, les physiciens pensaient que l'entropie est toujours croissante.

En effet, il faut comprendre que les premiers thermodynamiciens ne faisaient pas de la théorie pure. Ils étaient des ingénieurs travaillant sur les moteurs. C'est le cas de James Watt, de Carnot ou de Clausius. Cela étant, l'entropie avait été énoncée en rapport avec ce contexte ingénieurial. Ici, l'entropie était en lien avec les pertes observées dans le travail d'une machine à vapeur. On se rendait compte que toute l'énergie introduite dans le système pour le faire travailler la machine n'était pas totalement utilisée dans le fonctionnement du mécanisme. Il y avait des pertes dues aux frottements de pièces mécaniques entre elles, et ces pertes étaient irrécupérables. C'est pourquoi James Watt déclarait que, dans les situations réelles, une machine ne pourra donner qu'un rendement maximal de 25%, alors que les pertes pourront être de 75%. James Watt estimait encore que ces pertes sont impossibles à supprimer en situation réelle. Rappelons ces

propos de James Watt relayés par Jovan Mitrovic, qui montrent que les pertes ne peuvent être supprimées :

> In 1763, James Watt (1736-1819) was requested to repair a model of the Newcomen heat engine that consisted of a water boiler and a steam cylinder, equipped with a movable piston. In operation, the cylinder was used alternating also as a steam condenser. Watt repaired the model but he did not succeed to set it satisfactorily in operation. Subsequent Watt's analysis of the model that encompassed all energy losses, like mechanical friction and thermal losses of water boiler and the steam-condenser cylinder, revealed that only 25% of the steam generated in the boiler were economically used in the engine, while 75% were wasted (Mitrovic & Smyk, 2021; Mitrovic, 2022a; Mitrovic, 2022b). Watt's analysis dealing with energy dissipation and heat losses is apparently the first work of this kind in the history of (irreversible) thermodynamics.[256]

Ce sont ces pertes impossibles à supprimer dans les situations réelles que Rudolf Clausius appellera plus tard *entropie*. Carnot essayera de supprimer ces pertes en créant un moteur qui fonctionne avec 100% de rendement. Mais, c'était en violation du premier principe de thermodynamique, parce que la chaleur ne devrait pas être identique avant et après avoir fait travailler le moteur. Sinon, le travail effectué par moteur est sans cause. Il ne comprenait pas que son cycle était, en fait, entretenu par un système de recyclage de la chaleur composé d'un condenseur et une bouilloire.

Bref, le deuxième principe était censé s'appliquer parfaitement aux machines. Et là, l'entropie ne pouvait être que croissante. C'est pourquoi la physique et notamment la thermodynamique entretiendront longtemps l'idée que l'entropie est toujours croissante ou nulle. Cependant, la généralisation de l'entropie, en dehors du cadre des machines, a permis de voir des situations de décroissante entropique dans d'autres cadres thermodynamiques, et de se rendre compte que les situations réelles sont toujours des situations qui s'accompagnent d'une perte entropique rendant l'éventualité d'une *antithermodynamique* impossible. Donc, au niveau des systèmes locaux, il n'est pas rare de trouver de nombreux cas de décroissance entropique.

Pour aller plus loin, nous pouvons dire que le sort de la matière est de se retrouver dans cette situation de croissance entropique. Car, du point de vue phénoménologique, en intégrant le facteur temps, la croissance entropique peut être appréhendée par le vieillissement, la dégradation, la décomposition de la matière ; ce qui constitue des phénomènes naturels. La mort thermique correspond à une situation où les parties de la matière sont détachées les unes des

[256]Jovan Mitrovic, *Irreversible Thermodynamics of James Watt*, in Advances in Historical Studies/Scientific research publishing, Stuttgart, 2022, *Op.Cit.*

autres et deviennent complètement disloquées. Ce phénomène est inévitable, naturel et spontané. L'évolution spontanée est celle qui se déroule sans conditionnement préalable de la matière. De ce point de vue, la croissance entropique est un phénomène quotidien. Tous les systèmes locaux subissent ou finiront pas subir la croissance entropique. Celle-ci est omniprésente. On peut la citer dans une tasse qui se brise, une banane qui murit, un tissu qui vieillit etc.

Toute compte fait, l'entropie des systèmes thermodynamiques ouverts et fermés à l'échelle locale confirme, bel et bien, le deuxième principe de thermodynamique même si cela ne doit, ni être généralisé encore moins, être mis en valeur absolue, contrairement à ce que les pionniers du domaine avaient prédit. Mais, on doit tout de même dire que de nombreux cas corroborent la règle d'une évolution croissante de l'entropie, et qu'en plus de cela, tous les systèmes évoluant ainsi finiront par atteindre la mort thermique où les particules microscopiques constituant le système vont atteindre le seuil de désordre maximal, situation où l'objet est complètement vidé de son énergie interne.

7.1.2. Décroissance entropique et production d'entropie minimale dans les systèmes locaux

La façon alternative[257] de lire le comportement entropique des systèmes thermodynamiques à l'échelle locale, en dehors de la croissance dont nous venons de parler plus haut, est la décroissance de l'entropie, en rapport avec le deuxième principe de thermodynamique.

En effet, la réinterprétation moderne du deuxième principe de thermodynamique stipule que l'entropie d'un système thermodynamique isolé peut croître, contrairement à l'interprétation classique ou traditionnelle édictée par les pionniers qui étaient davantage des ingénieurs (énonçant des principes dans le cadre de leurs travaux), et qui interprétaient l'entropie comme une perte irrécupérable. Dans cette mesure, elle ne pouvait que croître. Par contre, l'interprétation moderne intègre l'entropie dans d'autres domaines de la thermodynamique, de la physique en général et dans des domaines inattendus. L'interprétation moderne voit en l'entropie une lecture du désordre d'un système donné ou alors son niveau d'information. Dans ce sens, l'entropie peut

[257] Il s'agit des deux possibilités alternatives du comportement entropique dans les systèmes locaux, étant donné que l'entropie peut croitre ou décroître selon les contraintes auxquelles est soumis le système, ce qui donne une compréhension plus dynamique du second principe de thermodynamique, et non plus une compréhension statique en faveur de la croissance exclusive.

bien croître ou décroître. On tombe là dans une interprétation statistique de l'entropie. Cela dit, dans les systèmes locaux, qu'ils soient isolés, ouverts ou fermés, la situation la plus probable de se produire est la décroissance d'entropie. Nous l'avons démontré dans les deuxième et troisième chapitres. En fait, ce qui était considéré comme l'exception à la règle est ce qui est devenu de règle. C'est cela même la particularité de la science moderne, à savoir de prendre en compte l'écart et l'exception, qui étaient jadis ignorés ou mis de côté,ou alors regardés comme relevant de l'erreur humaine. Il fallait que la loi fût conservée parfaitement, en faisant fi des situations où elle ne fonctionne pas. Léon Rosenfeld *: « Toute théorie physique est associée à des idéalisations qui rendent possibles la formulation mathématique de ses théories, c'est pourquoi aucun concept physique n'est suffisamment défini sans que soit connues les limites de sa validité ».*[258]La science moderne va donc intégrer l'exception et l'écart, non plus comme une simple erreur humaine d'observation ou de calcul, mais une propriété intrinsèque de la nature. Dans un travail précédent, nous disions que « *C'est cette exception-là, qui vraisemblablement ne faisait pas loi, qu'il faut dorénavant incorporer dans la loi. C'est elle qui fait toute la différence, car elle est une propriété essentiellement de l'objet. On doit donc prendre ensemble la règle et son extension. »* On ira même plus loin, non seulement en intégrant l'exception et l'écart, mais en en faisant la nouvelle règle. C'est dans cette mesure que la décroissance entropique est devenue la nouvelle règle, la mode, la nouvelle grille de lecture de l'entropie.

En effet, tous les systèmes sont susceptibles de faire baisser leur entropie, ne serait-ce que pour un laps de temps. Ainsi, les systèmes isolés voient baisser leur entropie par les phénomènes que nous avons étudiés au chapitre 2, entre autres : les frottements qui sont des forces mécaniques, les fluctuations qui jouent le même rôle que les dissipations. Ce qui a amené les physiciens à formuler le théorème des fluctuations (FT) qui est considéré aujourd'hui par certains thermodynamiciens comme un quatrième principe, en vertu de quoi l'entropie d'un système thermodynamique peut croitre laissant supposer qu'elle peut également diminuer. Le deuxième principe en vertu de la croissance de l'entropie doit donc être interprété comme une supposition, et non comme une nécessité absolue. Les fluctuations sont souvent des phénomènes inexplicables qui demandent encore quelques approfondissements par la physique. Parfois, on ne sait comment les expliquer. Prigogine va jusqu'à dire qu'elles se passent parfois par hasard. Il affirme :

[258] Léon Rosenfeld, *Théories de la causalité*, PUF, Paris, 1991, p.137.

> Typiquement, une fluctuation apparaît sous forme d'un évènement localisé à très faible échelle. Par exemple, dans une petite partie d'un système macroscopique, un certain nombre de particules peuvent acquérir une grande vitesse comparée à celle que présentent leurs voisines. De la même manière, la densité des particules dans un autre faible volume peut atteindre une valeur moindre que celle du voisinage, et ainsi de suite. Nous pouvons aisément comprendre que de tels évènements se produisent essentiellement au hasard.[259]

Ainsi, grâce à ces fluctuations qui sont un principe intrinsèque à la nature, une propriété irréductible, le deuxième principe de thermodynamique devient statistique et l'entropie peut décroître même dans les systèmes isolés. En plus de cet argument en rapport avec le théorème des fluctuations et les forces mécaniques, nous avons également soulevé le problème de l'impossibilité d'isoler véritablement un système. Il reste toujours influencé par le champ magnétique, les forces gravitationnelles et autres, au point où tout système est, en fait, un système ouvert ou fermé à l'échelle quantique. Or, n'importe quel système en contact avec le grand système (univers) forment ensemble des situations grand-canoniques ou canoniques (selon qu'ils échangent la matière et l'énergie ou seulement la matière), et où la température du petit système finit toujours par décroître en laissant intacte celle du grand système, qui joue alors le rôle de réservoir ou thermostat naturel. Dans ce cas, la température d'un système isolé conventionnel finit par décroître sous l'effet du couplage avec le grand système.

Par ailleurs, pour ce qui est des systèmes ouverts et fermés, le problème ne se pose pas. On sait que la grande révolution de la thermodynamique moderne, avant de s'attaquer au comportement de l'entropie dans les systèmes isolés, s'était effectuée dans les systèmes ouverts. (Par simplification, nous parlerons souvent des systèmes ouverts et fermés au même moment). Ainsi, Erwin Schrödinger est celui qui posa le problème de la décroissance entropique dans son œuvre intitulée : *Qu'est-ce que la vie ?* Pour la première fois, le concept d'entropie négative était évoqué, ce qui ne fut pas un long fleuve tranquille. Schrödinger montrait, par-là, que les systèmes où la vie se développe, sont des systèmes ouverts à entropie négative. Luis Felipe del Castillo, Paula Vera-Cruz nous retracent les débuts de l'introduction de l'entropie négative en physique par Erwin Schrödinger dans les années 1945 lorsqu'il affirme :

> Schrödinger established the first contributions to the field in 1944, offering some ideas about the concept of negentropy or negative entropy to describe the common fact that physiological processes gradually generate an increase of the internal "order" in living organisms. In the sense

[259] Grégoris Nicolis et Ilya Prigogine, *A la rencontre du complexe*, PUF, Paris, 1989, p. 89

> that the action of living matter opposes the degradation of the organic constituents by effect of the irreversibilities[260].

Les organismes vivants pour lutter contre la mort thermique, qui est le destin commun de tout ce qui est matériel, développent un mécanisme de réduction d'entropie qui a désormais pris le nom de *néguentropie* (terme dérivé de l'anglais « *negativ entropy* »). A partir de là, le problème était posé. Plus tard, on verra se déployer des théories sur les systèmes ouverts avec pour catégorie fondamentales, les dissipations.

Les dissipations sont la catégorie fondamentale à prendre en compte dans les systèmes ouverts. En effet, ces systèmes sont des systèmes qui peuvent dissiper leur trop plein d'énergie à l'extérieur du système pour éviter d'entrer dans la mort thermique. Par nature donc, les systèmes ouverts sont des systèmes dissipatifs. Ils constituent un type de systèmes qui reçoivent de l'extérieur une entropie soit négative pour baisser leur entropie, soit alors positive pour augmenter cette dernière. Parlant de ces systèmes dissipatifs, ils sont des systèmes qui ont connu des avancées considérables ces derniers temps, surtout dans le domaine de la chimie et de la physico-chimie où Ilya Prigogine a développé le concept de ***thermodynamique linéaire des processus de non équilibre***. C'est une thermodynamique qui étudie *les phénomènes dissipatifs*, c'est-dire les phénomènes qui se passent ***loin de l'équilibre thermodynamique***. Prigogine pense que l'équilibre nous offre peu d'informations ou du moins peu d'intérêt. Il parle, à propos, de l'aveuglement de la matière à l'équilibre. Mais, loin de l'équilibre, lorsque la symétrie spatio-temporelle est brisée, la matière commence à voir. Il affirme : *« La matière est aveugle à l'équilibre là où la flèche du temps ne se manifeste pas, mais lorsqu'elle se manifeste loin de l'équilibre, la matière commence à voir. Sans la cohérence des processus irréversibles de non-équilibre, l'apparition de la vie sur terre serait inconcevable ».*[261]Les structures dissipatives qui se développent dans les systèmes ouverts présentant des situations d'éloignement à l'équilibre, permettent ainsi à la matière de s'auto-organiser, de s'auto-assembler, pour former des organisations complexes. Selon Prigogine, la vie se développe loin de l'équilibre dans les systèmes ouverts. Aussi, à la question d'Erwin Schrödinger *« Qu'est-ce que la vie ? »*, pour Prigogine, la vie c'est un système ouvert, une entropie négative et une situation d'éloignement à

[260]Luis Felipe del Castillo, Paula Vera-Cruz, *Thermodynamic Formulation of Living Systems and Their Evolution*, Journal of Modern Physics, 2011, Published Online May 2011 (http://www.SciRP.org/journal/jmp), *Op.Cit*
[261]Ilya Prigogine, *La fin des certitudes*, *Op.Cit*., p.12.

l'équilibre favorisant les phénomènes dissipatifs, si pour Erwin Schrödinger, la vie c'est un système ouvert et une entropie négative,

De ce qui précède, nous pouvons dire que la décroissance entropique est quelque chose de très familier et de quotidien. Et pour cause, la vie est faite de systèmes ouverts. Ces derniers sont devenus la règle aujourd'hui. Car, comme nous l'avons dit, les systèmes isolés n'existent pas. Tous les systèmes, après un certain temps long ou court, finissent par sortir de leur îlot d'isolement, cédant matière et énergie à son environnement, et montrant qu'ils n'étaient pas si isolés que cela. De plus, partout où la vie se développe, par principe, l'entropie est négative. En effet, la biothermodynamique, nous apprend que la vie a horreur de l'entropie. Tous les processus vitaux convergent vers une unique chose : la lutte contre l'entropie, c'est-dire la lutte pour se maintenir. Car, l'entropie signifie la mort et l'extinction du vivant. Schrödinger affirme que :

> When a system that is not alive is isolated or placed in a uniform environment, all motion usually comes to a standstill very soon as a result of various kinds of friction; differences of electric or chemical potential are equalized, substances which tend to form a chemical compound do so, temperature becomes uniform by heat conduction. After that the whole system fades away into a dead, inert lump of matter. A permanent state is reached, in which no observable events occur. The physicist calls this the state of thermodynamical equilibrium, or of' maximum entropy'[262].

Tout compte fait, la décroissance entropique est la chose du monde la plus partagée chez les organismes vivants. Ils sont des systèmes qui luttent pour se maintenir, sachant que le sort de toute matière est la mort thermique. La production d'entropie négative est donc une manière d'éviter ou simplement de repousser cette mort thermique programmée. Cela dit, dans les systèmes locaux, l'entropie est très souvent décroissante, car le milieu local est constitué majoritairement de systèmes ouverts au sens large du terme, c'est-dire les systèmes conventionnellement dits ouverts ; mais il est aussi et surtout fait de systèmes vivants. Ceux-ci, par un processus biologique, ont su développer un mécanisme d'auto-régulation de l'organisme appelée homéostasie qui fait que le trop plein d'entropie est rejeté dehors par le phénomène des dissipations. En général, ces dissipations se caractérisent par des activités aux bords du système, c'est-à-dire que les processus de réduction ou d'augmentation d'énergie, d'entropie, de travail, de chaleur ou de matière qui se déroulent aux frontières du système où il est contact avec l'environnement. Il s'agit notamment des processus de rejet, d'élimination, de consommation de

[262]Erwin Schrödinger, *What is life? The Physical Aspect of the Living Cell,* (first printing 1944), Cambridge University Press edition, 1967, *Op.Cit,* p. 69.

nouvelles énergies pour compenser les pertes et les gains etc. Schrödinger ajoute: *« How does the living organism avoid decay? The obvious answer is: By eating, drinking, breathing and (in the case of plants) assimilating. The technical term is metabolism. The Greek word (μεταβαλλειν) means change or exchange »*[263].Après avoir parlé des systèmes locaux vivants et non vivants, il est aussi important de dire quelque chose sur l'entropie des systèmes locaux artificiels qui sont le fruit de l'ingénierie humaine, et qui sont, par ailleurs, à la base même du concept d'entropie.

7.1.3. La croissance entropique dans les systèmes mécanisés et ingénieuriaux et l'échec du projet de Carnot : James Watt, vainqueur de Carnot ?

Si nous définissons l'univers comme l'ensemble de tout ce qui existe, nous pouvons dire en revanche qu'il existe, dans l'univers, des systèmes thermodynamiques naturels et des systèmes thermodynamiques artificiels, ces derniers constituant des systèmes créés par l'homme à des fins utilitaires. En d'autres termes, ces systèmes mécanisés sont les fruits de l'ingénierie humaine. En fait, c'est quoi l'ingénierie ? Le terme ingénierie qui prend source au Moyen-Age renvoie surtout aux engins. Les ingénieurs étaient des personnes qui manipulaient des engins militaires d'alors. D'où le nom génie militaire. Ces engins permettaient d'obtenir un rendement plus important que ne l'aurait produit la main d'œuvre humaine. Dans un travail que nous avions produit précédemment, nous soulignions que :

> Il s'agissait précisément de personnes ayant la maîtrise des engins. Cet état de choses se précisera plus tard au Moyen-Age où, désormais, on parlera d'un génie militaire, renvoyant à tout un corps de métier formé et, ayant pour mission de concevoir, de construire et de manœuvrer le matériel de guerre. Le génie était donc d'abord militaire. Mais, avec le temps, d'autres corps de métier vont s'organiser et se spécialiser par secteurs d'activité : mines, ponts, bâtiments, architecture etc.[264]

Nous voyons donc, par-là, que l'ingénierie est en lien avec les engins. Ces engins ont connu une évolution considérable, partant des dispositifs très pénibles et encombrants à des dispositifs motorisés qui demandent moins d'effort contre un rendement significatif. Mais, le problème qui s'est toujours posé, c'est celui des pertes.

En effet, l'énergie introduite dans le moteur ne peut pas complètement être transformée en travail. Il y a toujours un écart entre l'énergie introduite dans le moteur et le rendement du

[263]Erwin Schrödinger, *Idem,* p. 70

[264]Jospin Brice FOE, *Enseignement et apprentissage par les supports didactiques et les dispositifs mnémotechniques*, et augmentation des performances : cas de la philosophie, mémoire, Université de Yaoundé1, inédit, p.17

moteur ; et cela a toujours créé un véritable malaise. Cette perte énormissime non récupérable due aux forces mécaniques du moteur sera nommée plus tard *entropie*. Le caractère non récupérable est signifié dans l'équation d'entropie par l'inégalité. Celle-ci informe sur l'irréversibilité du processus. L'énergie introduite ne peut plus être obtenue même par renversement de la thermodynamique. Car, les frottements mécaniques ont créé des dissipations de l'énergie mécanique en d'autres formes d'énergie devenues des énergies inutiles par rapport au rendement attendu. Pour un système fonctionnant avec de l'énergie mécanique, l'énergie thermique obtenue par les frottements des pièces mécaniques peut être considérée comme de l'énergie inutile ; elle est inutile par rapport à la tâche mécanique attendue.

De ce qui précède, l'entropie est donc quelque chose d'omniprésent qui crée en même temps de la gêne dans l'ingénierie mécanisée ou motorisée où elle est toujours croissante. On peut citer entre autres :

- Le moteur d'une voiture qui présente toujours des pertes qui s'échappent souvent sous forme de fumée attestant que l'énergie introduite n'a pas servi entièrement pour la tâche en vue de laquelle a été commise.
- La pile d'une horloge dont les bruits des frottements mécaniques attestent qu'il existe des frottements entre les pièces mécaniques qui dissipent la force mécanique du système impulsée par l'énergie de la pile. La durée de la pile se trouve alors diminuée, car le mouvement mécanique qu'elle impulse est freiné par la résistance des frottements des pièces.

Ces deux cas illustrent à suffisance les problèmes de l'omniprésence de l'entropie dans l'industrie ou dans les machines. Ainsi, les systèmes thermodynamiques construits par l'homme n'ont guère réussi, jusqu'à ce jour, à supprimer l'entropie. James Watt, lui, estimait que les pertes observées dans le rendement du moteur étaient impossibles à supprimer. Donc, ces systèmes sont des systèmes caractérisés par une production importante d'entropie. Revenons, un tant soit peu, sur ce queJovan Mitrovic disait à propos de James Watt :

> James Watt (1736-1819) was requested to repair a model of the Newcomen heat engine that consisted of a water boiler and a steam cylinder, equipped with a movable piston. In operation, the cylinder was used alternating also as a steam condenser. Watt repaired the model but he did not succeed to set it satisfactorily in operation. Subsequent Watt's analysis of the model that encompassed all energy losses, like mechanical friction and thermal losses of water boiler and

> the steam-condenser cylinder, revealed that only 25% of the steam generated in the boiler were economically used in the engine, while 75% were wasted.[265]

James Watt, qui ne peut pas réduire les pertes de la machine à vapeur sur laquelle il avait travaillé, voit donc dans l'entropie une sorte de nécessité existante dans les systèmes mécaniques réels.

Sur ces entrefaites, après James Watt, arrive un jeune ingénieur français du nom de Sadi Carnot qui prétendra supprimer toutes les pertes dans un cycle à 100% de rendement. C'était un projet ambitieux et exaltant en même temps, car l'industrie mécanisée allait connaître des avancées vertigineuses en faisant d'énormes économies d'énergie. Car, si on supprimait toutes les pertes qui, selon James Watt, étaient plus importantes que le rendement final, la machine produirait quatre fois que ce qu'elle produit d'habitude. Carnot ambitionnait ainsi un grand projet : les systèmes thermodynamiques locaux qui ne produisent pas de pertes ou plus simplement des systèmes thermodynamiques sans entropie. Cela est souvent appelé *moteur de Carnot*. Le *moteur de Carnot* qui est souvent décrit comme un moteur idéal était un dispositif ditherme avec une bouilloire chaude et un condenseur telle sorte que la quantité de chaleur soit maintenue avant et après le travail en supprimant toutes les pertes. Le problème de ce dispositif dit *moteur de Carnot* était de deux ordres :

- Le premier problème est la violation du premier principe de thermodynamique par Carnot

Carnot violait le premier principe de thermodynamique en rapport avec la conservation d'énergie en se disant que la quantité d'énergie avant et après le travail était la même. Cette quantité d'énergie ne pouvait pas être la même après que la chaleur initiale a fait tourner le moteur. Le fait que le moteur tourne signifie que la chaleur du dispositif s'est transformée en travail ; et c'est ce travail qui a fait tourner le moteur. C'est le principe de la transformation thermomécanique. A l'issue du processus thermomécanique, la quantité de chaleur ne peut plus être la même. Nous savons que la formule de l'énergie en rapport avec la chaleur et le travail s'écrit E= Q+W. Quand la chaleur est convertie en travail, et que cela a fait tourner le moteur, cette chaleur ne peut plus être maximale. Sinon, on viole le premier principe de conservation de l'énergie. L'énergie est une propriété qui se transmet d'un corps à un autre afin le faire bouger ou alors de le chauffer. Elle ne se crée pas, elle se transforme seulement. La quantité d'énergie qui

[265]Jovan Mitrovic, *Irreversible Thermodynamics of James Watt*, in Advances in Historical Studies/Scientific research publishing, Stuttgart, 2022, *Op. Cit,*

s'est transformée en mouvement implique un minimum de chaleur dans l'enceinte et non pas un maximum récupérable. Mathilde Blaise, qui a reconsidéré le moteur de Carnot dans une étude, en dit long :

> Sadi Carnot propose en 1824, dans une *Réflexion sur la puissance motrice du feu*, de théoriser la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique. Il introduit la notion de maximum de de puissance récupérable directement liée à la réversibilité des processus. Dans ses écrits, il imagine une machine idéale entièrement réversible […] L'irréversibilité des transformations est en effet inhérente au mouvement et aux transferts de chaleur réalistes […] Cependant, si on souhaite dimensionner de manière un condenseur, la thermodynamique de l'équilibre aboutit à des résultats qui n'ont pas de sens en physique. »[266]

Ce qui est intéressant dans l'analyse de Mathilde blaise, c'est le fait qu'il affirme que Carnot soit arrivé à des résultats qui n'ont pas de sens en physiques. Donc la récupération de la puissance maximale est une erreur d'ingénierie. Cela est impossible dans la pratique. La chaleur ne saurait être la même pour continuer éternellement le processus. Et l'irréversibilité affirmée par le critique, est quelque chose d'inhérent au principe de la transformation thermomécanique. Elle suppose une inégalité entre ce qui est entrée dans le moteur et ce qui est sorti. Ce qui nous rappelle le principe des pertes en lien avec l'entropie.

- Le deuxième problème est celui de la suppression des pertes et/ou la suppression de la production d'entropie

Si on venait à supprimer les pertes, la création d'entropie dans le moteur serait nulle : c'est d'ailleurs le principe de la réversibilité du *cycle de Carnot*. Mais, on sait que les transformations réelles, par principe, sont irréversibles à cause de l'entropie. En effet, le rendement théorique maximal de tout système qui transforme l'énergie thermique en énergie mécanique en thermomécanique est de $\mathbf{r} = \frac{T2-T1}{T2}$, T2 étant la température absolue de la source chaude, et T1 la température absolue de la source froide.

Il est démontré que le maximum théorique est de 50%, tandis que dans la pratique, les meilleurs systèmes arrivent à 40%. Ce qui est très proche du maximum théorique. Et même jusqu'à ce niveau, les pertes subsistent. Un rendement maximal de 100% reste donc une idéalisation.

[266] Mathilde Blaise, *Reconsidération du moteur de Carnot : de la faisabilité thermodynamique à la faisabilité technique. Génie des procédés*, Université Lorraine, Nancy, 2013, p 6, in htttps:// hal.univ-lorraine.fr/ hal-01862170

Tout compte fait, Carnot avait une idée de génie et son rêve était très ambitieux. Mais, ce rêve reste une idéalisation, la réalité nous montre autre chose. Carnot avait donc violé les principes de thermodynamiques fondamentaux en lien avec la conservation d'énergie et en lien avec la production d'entropie pour les systèmes mécanique réels. Un système mécanique présentera toujours des pertes en lien avec les forces mécaniques internes au système.

Pour terminer ce point, il importe de savoir que, dans les systèmes thermodynamiques locaux produits par l'ingénierie humaine, il est impossible de supprimer la production d'entropie quand il s'agit de transformer une source d'énergie thermique en énergie mécanique capable de produire un travail. Le rendement théorique maximal ne peut pas être de 100% par principe. Tout l'énergie introduite ne sera pas utilisée, il n'aura toujours une quantité inutilisée. Elle ne peut l'être qu'à 50%. Ensuite, dans la pratique, ce rendement sera encore amoindri, à cause des pertes liées aux situations réelles dans lesquelles il faut intégrer les frottements et les frictions multiples qui se créent à l'intérieur du système. L'entropie sera donc de règle dans les systèmes que nous créons. Elle est présente dans toutes les ingénieries mécanisées. Sur cette base, nous pouvons affirmer que James Watt est vainqueur de Carnot. Car, il a posé les bases et les limites que Carnot n'a pas pu défier. L'entropie est toujours croissante dans les machines, les dispositifs techniques, les moteurs multiformes que l'homme fabrique. Tout ce qui nous reste donc à faire est de minimiser au maximum l'entropie à l'effet d'obtenir un rendement plus significatif. Mais, tant que l'on aura affaire à des situations thermodynamiques réelles, il faudrait toujours compter avec les pertes. L'entropie est alors croissante dans les systèmes thermodynamiques créés par le génie humain, que ce soit à l'échelle manuelle ou industrielle. C'est la nature qui l'impose et l'homme n'y peut rien. En Grec, l'entropie signifiant la transformation de l'énergie, (le terme est formé à partir du mot grec *τροπή* qui signifie la transformation auquel on colle l'imitation du mot énergie[267]), une fois que l'on pose la transformation d'une énergie en une autre, on pose l'entropie. Après avoir réécrit le comportement entropique des systèmes locaux que nous avons estimée croissante dans de rares cas, et décroissantes dans la plupart des cas, il reste maintenant à réécrire le comportement de l'entropie universelle.

[267]Cf supra chapitre 2.1.1

7.2. Troisième principe et réécriture de l'entropie générale

7.2.1. Echec du deuxième principe sur le système thermodynamique géant

La proposition de la réécriture du nouveau paradigme entropique se joue sur la bataille entre deux principes fondamentaux, à savoir le deuxième principe et le troisième principe. Nous avons montré que le deuxième principe sied le plus aux systèmes locaux dont l'entropie n'a plus un sens privilégié. Elle pourrait prendre l'une ou l'autre direction, selon les cas. Cependant, nous voulons rappeler que le deuxième principe s'est avéré inadapté à l'univers. Nous voulons rappeler tout d'abord ses énonciations :

- Dans un système isolé, l'entropie croit toujours jusqu'au seuil maximal, pour ce qui est des systèmes réels, ce qui implique l'irréversibilité de la transformation. D'où l'inégalité entre les deux termes de l'équation ($S \geq 0$). Dans les systèmes fictifs, la production d'entropie est nulle, ce qui rend la transformation réversible. D'où l'égalité entre les deux termes de l'équation ($S = 0$)
- Dans les systèmes ouverts, le bilan entropique est une somme des deux entropies : l'entropie du système et l'entropie venant de l'environnement. $\mathbf{S_{totale} = S_{syst} + S_{ext} \geq 0.}$

Nous avons dit, dans un premier temps, que la formule entropique d'un système ouvert ne pouvait être appliquée à l'univers, car cela serait un non-sens que de parler d'un univers autre que celui qu'on connait, étant donné que l'univers l'englobe tout ce qui existe, connu ou non connu. Dans ce cas, une formule qui intègre un environnement extérieur capable de transmettre la chaleur, le travail ou encore de la matière à l'univers est antinomique et contradictoire. On ne saurait poser quelque chose qui comprend tout, et admettre autre chose qui n'en fasse pas partie. Il nous reste alors la première possibilité qui consiste à traiter l'univers comme un système isolé, le plus isolé de tous les systèmes thermodynamiques.

Au moins, la prise de conscience qu'il existe un certain système thermodynamique qui soit réellement isolé a pu certainement réjouir celui-là qui réfléchit sur la thermodynamique, car les vrais systèmes isolés n'existent pas. Mais, en fait de réjouissance, c'était une réjouissance éphémère. Et pour cause, aussitôt voudrait-on appliquer idéalement les principes thermodynamiques en lien avec les systèmes isolés sur ce nouveau système qu'on se retrouve coincé. Le système thermodynamique géant, bien qu'isolé, n'entre dans aucune catégorie thermodynamique, à cause du fait qu'il présente des irrégularités qui le rendent atypique et *sui*

generis. Pour illustration, il ne présente pas de frontières, ce qui rend ses variables intensives et extensives très fugaces. Nous savons ce que les frontières représentent pour un système isolé. Non seulement, ce sont-elles qui permettent au système d'être isolé, mais en plus de cela, ce sont-elles qui permettent de fixer les variables. Sans frontières, on ne saurait avoir un *volume contrôlé*, encore moins une *pression contrôlée* et des contraintes thermiques stables. Nous savons que l'énergie d'un système thermodynamique est donnée dans la formule E= Q+W. Or, pour un système isolé, on sait que *Q*, la chaleur reçue est nulle, parce que le système ne reçoit pas de chaleur. Il ne reste donc que *W* qui correspond à l'ensemble des forces internes qui travaillent. Ces forces sont difficiles à définir avec exactitude parce qu'il faut connaitre avec détail chaque paramètre du grand système thermodynamique (vitesse, position, masse). Pour faciliter les calculs, nous pouvons changer *W* par un terme correspondant plus facile à manipuler, c'est-à-dire le produit pression-volume. W= - PdV. Mais, malheureusement cela ne mène à rien, car la pression de l'univers est tout aussi bien quelque chose de fugace, dans la mesure où il n'a pas de frontière. Parler d'une pression sans frontière est une erreur épistémologique, parce que la pression est une force qui s'exerce sur toutes les frontières d'un système de manière équitable[268]. La gêne est que notre système ne présente pas de frontières. Ce qui implique le fait que le volume de l'univers est instable. C'est un volume qui n'est pas contrôlé puisqu'il n'existe pas de limites ni physiques ni imaginaires. Cela dit, il manque des données essentielles pour être rigoureux dans les calculs. Cela étant, on se contente travailler avec des données provisoires. On peut juste ramener les calculs à l'horizon cosmologique qui est une limite au-delà de laquelle aucune connaissance n'est plus possible.

En fin de compte, on se retrouve devant le système le plus impénétrable de tous les systèmes. Le deuxième principe ne peut plus s'appliquer. Et le plus étonnant est que, contrairement à ce qu'on aurait attendu de voir se réaliser, la température est presqu'à son minimum. L'infini négatif de la température en physique est ce qu'elle considère comme le zéro absolu, à savoir T= -273,15º Celsius. L'univers n'est pas loin de là. Il se trouve à deux degrés seulement au-dessus du zéro absolu. Or, le deuxième principe ne parle pas de température basse. Selon, lui l'entropie croît toujours jusqu'au seuil maximal. Il s'agit d'une situation d'équilibre thermique où toute la matière serait dispersée dans tout l'univers et formerait une soupe de particules correspondant au chaos maximal. Son entropie serait alors de l'ordre de zéro. L'une

[268] Cf supra chapitre 4.2.1

des hypothèses en cosmologie scientifique parle alors d'une situation thermique de grand froid dénommée *big chill*, car l'univers aurait dissipé toute sa chaleur qui serait alors dissoute dans toutes ses parties.

Nous voyons très bien que, fort de ce dernier argument, l'application du deuxième principe est forcée. Si on parle d'un grand froid, il est incompatible avec le deuxième principe. Le deuxième principe ne traite pas des températures basses. La température peut décroitre jusqu'à un seuil minimal où elle ne change plus, lorsque se retrouve distribuée de façon égale toutes les particules dans toute l'enceinte. Il y a donc lieu de comprendre que le deuxième principe n'est pas le plus adapté pour décrire le comportement entropique d'un univers qui tend vers le grand froid. Y a-t-il d'ailleurs un plus grand froid que le zéro absolu ? Nous répondons indéniablement par la négative. Le big chill, lui-même, doit être réinterprété.

Il est donc question de repenser l'écriture de cette entropie de l'univers à partir d'un autre principe. Le principe le plus adapté serait celui qui pose le réellement le problème du grand froid. L'idée du grand froid est parfaite, car c'est elle qui est en cours de réalisation d'après les observations. Mais jusqu'ici, elle était posée avec un mauvais principe. Le prochain point consiste donc à prendre en compte ces données d'observation pour les faire correspondre avec les données théoriques. Nous avons dit que les sciences expérimentales fonctionnent avec deux types d'énoncés, à savoir : les énoncés théoriques et les énoncés d'observation. Les énoncés théories servent de préalable théorique aux énoncés d'observation. Mais, ils ne peuvent pas malheureusement être vérifiés directement. Ils ne peuvent l'être que par le truchement d'énoncés d'observation. C'est ce que nous rapporte Pierre Sagaut : *« Les énoncés théoriques ne sont pas directement vérifiables : ils ne peuvent être mis à l'épreuve que par le biais des énoncés d'observation que l'on peut déduire d'eux »*.[269]Il s'agit de comprendre en clair que les énoncés d'observation peuvent amener à falsifier la théorie préalablement énoncée par les énoncés théoriques. Pour notre cas, la réalité nous amène à demander si les énoncés théoriques sur la croissance entropique de l'univers ne sont pas faux, au regard de la courbe des températures de plus en plus basses que connait le système thermodynamique géant. On va s'enfonçant vers un froid de plus en plus accentué. Toute chose qui corrobore la marche de l'univers vers big chill. Toutefois, apparemment, il s'agirait d'un *big chill inversé*. C'est pourquoi, nous nous proposons

[269]Pierre Saugaut, Introduction à la pensée scientifique moderne, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Université Pierre et Marie Curie – Paris 6, pierre.sagaut@upmc.frhttp://www.lmm.jussieu.fr/~sagaut, p.106.

de convoquer le troisième principe, qui, seul, peut prendre compte des températures très basses voire le zéro absolu.

7.2.2. De la proposition d'une reformulation de l'entropie de l'univers à partir du troisième principe de thermodynamique : et la méprise de Max Planck par Boltzmann

C'est ici la grande révolution copernicienne que nous nous proposons de faire. Il s'agit de réécrire l'entropie de l'univers à partir, non plus du troisième principe de thermodynamique qui ne fonctionne pas, de toute évidence. Les résultats se contredisent et l'observation ne s'accordent pas avec les principes actuels. Face à une telle situation, il faut se remettre en question radicalement pour tout reprendre. Ce recommencement radical ne signifie pas rejet absolu de tout, mais remise en question ou évaluation critique des méthodes, procédés ainsi que les lois et principes physico-mathématiques qui ont conduit la réflexion. Ainsi, après l'examen profond de tout ceci, nous nous sommes rendu compte que le troisième principe de thermodynamique doit devenir la clé de compréhension du comportement de la thermodynamique de l'univers à l'échelle globale. En effet, c'est le principe qui est le plus susceptible de coller avec les données d'observation. Pendant longtemps, la science a fait fausse route de vouloir, à tout prix, faire correspondre l'entropie générale de l'univers au deuxième principe de thermodynamique. Cette erreur a fait que beaucoup de prévisions échouent. C'est ainsi qu'aujourd'hui la thèse de Boltzmann sur la mort thermique de l'univers est de plus en plus abandonnée, parce qu'on s'est rendu compte que le deuxième principe était très inadapté à l'univers, et surtout à cause de son signalement atypique (difficulté à ranger l'univers dans tel ou tel système). Or, ce deuxième principe a besoin qu'on spécifie clairement que le système est un système isolé pour bien l'appliquer. Dans le cas contraire, on se retrouve à forcer simplement les résultats.

De plus, le deuxième principe ne pouvait pas être fonctionnel, parce qu'il a besoin d'un certains nombres de données nécessaires aux formules de l'équation de l'état entropique ou de la variation d'entropie (contraintes intensives et extensives du système : température, chaleur, pression, volume, quantité de matière etc.) Au regard donc de tout cela, fort des données recueillies sur l'état de l'univers depuis le big bang où la température a chuté progressivement au cours du temps, en partant de l'instant initial, où elle aurait pu atteindre des valeurs tendant vers l'infini, en passant par 380 000 ans après le big bang où elle était de T= 3000 K, en passant

encore par T=20 K, un milliard d'années après le big bang, et T=5,2 K entour de 7,2 milliards d'années après le big bang, jusqu'à aujourd'hui, presque 13,5 années après le big bang où cette température est descendue à T=2,7K, il y a donc lieu de considérer avec grand intérêt cette chute température pour réexaminer l'entropie de l'univers. Cette chute drastique ne peut guère signifier que l'entropie croit, car la croissance entropique fait évoluer le système vers la mort thermique qui n'a rien à avoir avec le zéro absolu. Mais au contraire, l'évolution négative de la température plonge l'univers dans un seuil très proche du zéro absolu, plus que deux degrés seulement au-dessus de celui-ci. Pour rappel, la température de l'univers est de -270° Celsius. Dans Wikipédia, on peut lire les données suivantes sur la température l'univers :

> La température de l'univers a été extrêmement élevée juste après le Big Bang, par exemple de l'ordre de 10^{32} K à la fin de l'ère de Planck (10^{-43} s après le Big Bang). Ensuite elle n'a pas cessé de diminuer, en relation directe avec l'expansion de l'Univers (détente adiabatique). La température est en particulier passée au-dessous de 3 000 K environ 380 000 ans après le Big Bang, ce qui a enclenché la Grande recombinaison et l'émission du rayonnement cosmologique. En 2022, la température de l'univers un milliard d'années après le Big Bang a pu être mesurée à a peu près 20 K, confirmant que l'univers s'est refroidi très rapidement après le Big Bang[4]. La température de l'univers il y a 7.2 milliards d'années a été mesurée à 5,1 K en mesurant la température de molécules de gaz dans une galaxie éloignée de cette distance[270]

Si la température n'a cessé de chuter, cela signifie qu'elle provient d'un maximum de température. Ainsi, le point initial a toujours été considéré comme un point très chaud voire infiniment chaud et dense. Et partant, nous avons montré que nous sommes partis d'une température très élevée, tendant vers l'infini vers une température très basse tendant vers le minimum de température qui est donc le zéro absolu.

En faisant dériver la fonction entropique par rapport à la température, on obtient un résultat qui tend vers zéro. Cela signifie que lorsque la température est très élevée, l'entropie tend à être nulle.

$$\Delta S \Rightarrow \lim_{T \to +\infty} \left(\frac{QS}{\partial T} \right)_T = 0^+$$

Si le point initial fut très chaud et dense, son entropie a pu tendre vers zéro. Et au fur et à mesure que la température baissait par le phénomène de détente de l'univers, l'entropie baissait également. En d'autres termes, cela signifie qu'après l'instant de Planck, presque 10^{-43}s après le

[270]https://fr.wikipedia.org/wiki/Temperature_de_l'Univers

big bang où la température était de $T=10^{32}$ K, l'entropie a pu tendre vers zéro. A un moment donné, avec la chute progressive de la température avoisinant des seuils très froids, la production d'entropie a commencé à être négative. Ce refroidissement s'explique simplement par le fait que l'univers se détend, c'est-dire qu'il varie de volume à chaque instant. Or, la deuxième loi des gaz parfaits lie la température au volume, tel que : à pression cons tante, la température soit inversement proportionnelle au volume. $P=nRT/V$. Donc, l'expansion de l'univers entraine la détente de son volume qui implique la baisse de sa température selon la loi de gay-Lussac. D'où la grande température actuelle qui correspond à une température très basse que le seul le troisième principe prend en compte.

MAX PLANCK

$$S=\log W.\ Kb+S_0\,(0K)=0\ K$$

Le troisième principe de thermodynamique est une formule forgée par de Max PlanckS= *log (W).Kb+S_0 (0K).* La plus grave erreur est celle qu'a commise Boltzmann d'enlever l'autre terme de la formule de Max Planck pour ne retenir que *S= log(W).Kb*, sous prétexte que les deux formules se valent, sous-entendant que So (0K) donne un résultat nul. Du point de vue des calculs, les deux formules se valent bien. Cependant, Boltzmann était sorti du sens qu'indiquait Max Planck. Un physicien de haut vol, à qui la communauté scientifique est reconnaissante pour son génie et ses contributions nombreuses, n'aurait pas pu ignorer que n'importe quel chiffre auquel on ajoute zéro, laisse le chiffre initial invarié. Il y a une énigme à résoudre dans la formule de Max Planck que Boltzmann n'a pas comprise. Pascal Marquet dans son développement sur l'entropie, affirme que

> In the formula of Planck appears the constant S_0 (0K) which disapperared from the famous Planck formula inscribed on Boltzmann's tomb S= logw.Kb. This constant corresponds to absolute zero temperature where, by hypothesis, all statistical microstates are generated into a unique configuration of maximum probability w=1, leading to log (w)=0 by definition of logarith and therefore to S=0 if the constant S is set to zero.[271]

[271] Pascal Marquet, The third law of thermodynamics or an absolute definition for Entropy. Part 1 : the origin and application in thermodynamics. Météo-France, CRMM/GMAP, Toulouse, 2019, p. 7.

Ce qui est intéressant dans la citation précédente, c'est la remarque préliminaire de Pascal Marquet. Il remarque que quelque chose a disparu de la formule de Max Planck, parce que Boltzmann se disait certainement que cela n'influençait pas le résultat, quel que soit le cas. Or, pour Max Planck, c'était un code à déchiffrer. Dans un article consacré à l'entropie paru dans le site *astronoo*, la rédaction affirme, à tort, que la formule $S = Kb.logW$est de Planck, mais que c'est Boltzmann qui l'a bien comprise, ce qui est vrai dans une certaine mesure et faux dans l'autre. En effet, l'article affirme : *« La formule de Boltzmann est S= K LnΩ. En réalité, la formule S= K logW est de Max Planck (1858-1957) mais c'est Boltzmann qui l'a bien comprise. »*[272] Cela dit, nous ne contestons pas le fait que la formule soit de Max Planck, quant à dire que c'est Boltzmann qui l'a bien comprise est contestable. Boltzmann n'est pas entré dans le sens de la formule de Max Planck où l'ensemble des micro-états serait réduit à une seule configuration cristalline. Au contraire, il en était resté au nombre exponentiel de micro-états qui ferait toujours de l'ensemble un système à entropie élevée.

En effet, Max Planck a une formule constituée de deux termes : d'un côté, un nombre exponentiel décrivant l'ensemble des micro-états tout comme Boltzmann, et de l'autre côté, un terme nul décrivant l'entropie au zéro absolu. Le terme exponentiel pointe vers le terme nul. Cela pourrait signifier que le chiffre exponentiel des micro-états ne doit pas faire douter le chercheur au vu des nombreuses configurations qu'offre le système. Max Planck voulait certainement signifier que les configurations seraient peut-être nombreuses avant de se figer et devenir une seule configuration quand la température atteindrait le cap minimal critique. Le terme nul qui figure dans l'autre partie de l'équation indique au chercheur là où le résultat converge. Car, il n'est pas question que toutes les configurations soient ramenées par la gravité en un seul point. Mais, il s'agit que tous les états soient figés pour former une seule configuration que la physique appellera plus tard le *condensat* lors de la découverte de la supraductivité du courant continu en 1911 par Heike Kamerlingh Onnes, lorsque la matière est refroidie en deçà du seuil critique pour devenir un supraconducteur. C'est le système tout entier lui-même qui se fige donc à travers ses composantes internes. Le système ne converge donc pas vers point unique, mais il maintient son volume. Ce qui change, c'est que les mouvements des molécules qui le constituent s'arrêtent définitivement sous l'effet d'un refroidissement progressif. Cela ressemble à un contenant rempli d'eau que l'on place dans une enceinte très froide ; supposons un

[272] *Définition de l'entropie* in www.astronoo.com/fr/article

congélateur qui est capable de produire des températures très basses. A ces températures basses, l'eau se solidifie et devient un seul morceau glace tout en occupant le même volume. Si on continue à la refroidir davantage, le contenu se solidifie davantage jusqu'à ce qu'on atteigne, de façon imaginaire un seuil critique où tout est figé. Le volume d'eau dans la bouteille est supposé former une seule configuration même s'il continue de présenter plusieurs particules disposées çà et là. L'interprétation ultérieure du condensat montre que même le vide entre les atomes se figent puisque celui est n'est pas vide en tant que tel. Selon le modèle BCS[273], le condensat est imperméable parce que les atomes ne sont pas seulement des corpuscules mais aussi des ondes.

Du point de point de vue de leurs structures ondulatoires, lorsqu'ils se figent les ondes constituant les vides entre les électrons se figent aussi et la structure est opaque voire imperméable à tout, même au magnétisme. Cette structure à cet état, est une unique configuration contenant des configurations exponentielles. Nous y reviendrons chapitre suivant.

Tout laisse à croire que les thermodynamiciens ont abandonné cette piste parce qu'ils tombaient sur des résultats qu'ils estimaient exponentiels voire insolites. C'était, de toute évidence, des résultats très grands qui ne permettaient pas de postuler pour la thèse d'une entropie très faible tendant vers zéro

En effet, le génie Max Planck annonçait que malgré le nombre exponentiel de configurations que l'on peut observer, si on arrivait au zéro absolu, toutes ces configurations seraient réunies en une seule pour donner un résultat nul au premier terme de la formule (Kb. Log1=0). Cela dit, l'on doit garder en esprit le zéro absolu comme une référence même si la formule indique des chiffres très grands. C'est le sens du deuxième terme de la formule qui est, en fait, un chiffre nul, à savoir So (0K). C'est le fil d'Ariane qui doit guider le physicien. Ainsi, ce que Boltzmann avait retranché, c'est ce que nous nous proposons de restaurer, pour pointer vers la direction de la formule de Max Planck.

L'univers n'a donc pas besoin d'être ramené à un seul point pour comprendre l'applicabilité de la formule du troisième principe. Les configurations pourraient bien demeurer

[273] C'est le modèle explicatif apporté par John Bardeen, Leon Neil Cooper et John Robert Schrieffer en 1957, pour expliquer l'expulsion du magnétisme voire la lévitation magnétique par le condensat devenu supraconducteur, et gagnant un prix Nobel.

nombreuses, mais, à un moment donné, si la température continue de chuter, tous ces états vont se figer et former une seule configuration tel que, S=*log(W). Kb+S_0 (0K) = 0 K.*

En fait, dans des contraintes très froides au zéro absolu, c'est l'univers lui-même en tant système thermodynamique géant qui est appelé à former une seule configuration avec tout son contenu. Il n'est donc pas question que tout se ramène en un seul point unique.

Max Planck est donc la solution pour réécrire l'entropie de l'univers ; une entropie qui se veut de plus en plus décroissante. Le chiffre exponentiel des micro-états que l'on obtient dans la formule ne doit donc pas faire douter ni reculer le chercheur. En effet, Boltzmann et beaucoup de physiciens n'ont pas compris le code de Max Planck. Ils l'ont interprété mathématiquement mais sans entrer dans l'esprit de la formule. Le zéro absolu signifie que les atomes ne vibrent plus à cause du grand froid (ils ne produisent plus aucun mouvement, la dance des particules s'arrête). C'est ce qui se passe avec la supraconductivité où tout le système se fige, ne pouvant plus faire pénétrer le champ magnétique.

Pour conclure, le nouveau paradigme d'une réécriture de l'entropie de l'univers se fait à partir du troisième principe tel que cela a été pensé par celui qui l'a formulé, à savoir Max Planck et non pas Boltzmann. Car, si on perd l'esprit de Max Planck, et que l'on s'en tienne uniquement aux calculs mathématiques, on aura le même résultat, sans avoir le même esprit. Chez Boltzmann, ce résultat est muet et en même temps il apporte de l'inconfort vis à vis de la recherche tout en désorientant le chercheur. Pourtant, chez Max Planck, si on le lit entre lignes, toute la formule est un code : le deuxième bras de la formule oriente le chercheur en lui faisant comprendre que le chiffre exponentiel obtenu au premier bras de la formule ne doit pas l'effrayer, il est très proche du zéro absolu qui se trouve tout près, dans ce deuxième bras.

7.2.3. Conséquences : Réinterpréter le *big chill* à la lumière du troisième principe

Après avoir réécrit l'entropie de l'univers sur la base du troisième principe de thermodynamique sous sa forme originelle, à savoir le troisième principe selon la formule de Max Planck, il s'agit maintenant de tirer les conséquences et les implications d'une telle reformulation. Ces implications sont nombreuses et innovantes puisqu'il s'agit d'une révolution copernicienne par rapport à tout ce qui était dit et fait sur l'entropie de l'univers. Il va donc falloir réinterpréter un certain nombre de choses qui nous viennent de l'observation.

La première conséquence est que l'univers n'est pas chaotique. Si l'entropie décroit, cela est contradictoire avec un état chaotique. L'entropie négative correspond avec l'ordre et l'organisation. C'est pourquoi, il faut théoriser à nouveau un modèle thermodynamique universel caractérisé par l'ordre et l'organisation. Nous avons dit que le big bang n'a pas eu lieu comme une déflagration ou une explosion d'une tombe propulsant les fragments dans tous les sens, et créant une situation de chaos généralisé. Nous pensons que le point initial s'est détendu en se dilatant. C'est le phénomène qui est au cœur de la thèse de l'expansion de l'univers. L'univers se dilate donc sous l'effet d'une force qui le pousse à s'élargir ; cette force se nomme l'énergie noire dont la physique a encore trop peu d'informations. On sait juste qu'elle l'emporte sur la force gravitationnelle, en agissant comme une force répulsive. La vitesse d'expansion peut être calculée, connaissant la constante de Hubble à l'heure actuelle, environ 67Km /s/mégaparsec/[274], ce qui équivaut à une vitesse d'éloignement $V = H_{o.}\, r$.

Cela témoigne de ce que l'univers se détend de plus en plus en gagnant en volume, tout en gardant sa structuration. Nous avons montré que le *théorème à n corps* et le *théorème H* pris comme exemple ne s'y appliquaient pas, car l'ordre est la première observation qui frappe l'observateur qui regarde l'univers. A ce niveau, nous avons dit que l'univers a gardé sa mémoire. En regardant son état actuel, on peut reconstituer son passé, et prédire son évolution future. Ce qui n'est pas possible dans un système chaotique qui est, par principe, un système indéterministe et d'évolution imprédictible. L'univers serait donc ordonné et organisé, contrairement à ce qu'on a toujours cru. Et de fil en aiguille, au fil du temps, le volume se détend, la température augmente faisant chuter l'entropie. D'une entropie à maximale (ce qui est le plus probable d'être arrivé à l'instant initial, lorsque toutes les variables intensives étaient à l'équilibre), l'entropie n'a cessé de diminuer jusqu'à l'atteinte des valeurs très basses. Aujourd'hui, avec un univers très froid qui passe à la limite du zéro absolu, l'entropie de l'univers, quant à elle, passe à la limite de zéro. Nous tendons donc vers le big chill. Cependant, il ne s'agit plus d'un big chill théorisé dans le cadre du deuxième principe et qui par surcroit, collait mal avec ce dernier, mais d'un big chill théorisé à partir du le troisième principe.

En effet, la mort thermique colle mal avec l'idée d'un big chill. Le big chill signifie grand froid. Il s'agit d'un froid maximal, le plus important dans l'histoire de l'univers. Certains

[274] Un mégaparsec correspond à 3 261 150Année-Lumière. Une année lumière est la distance parcourue par la lumière en un an qui est de 299 792 458/S soit environ 300 000 000/S. in *Univers* www.astrophysic.org

théoriciens l'ont fait correspondre avec la mort thermique. Cependant, pensé de cette manière, la théorie bat de l'aile ; on a plutôt l'impression que la logique est un peu forcée, quand on sait que le la mort thermique intervient à l'équilibre thermodynamique lorsque les variables intensives (température, pression) sont distribuées de façon égale dans tout le système. Nous avons que la température d'un système dépend de la chaleur introduite dans ce système, et qui va se répartir dans l'enceinte du système. A l'issue du processus, on ne saurait avoir affaire à un grand froid, mais plutôt à un équilibre thermique encore appelé mort thermique Or, partant des acquis en thermodynamique, la mort thermique ne saurait être assimilée au grand froid de l'univers. Il pourrait y avoir du froid si la mort thermique était réalisée, mais sans que cela soit, de façon réaliste, le grand froid au sens d'un froid inédit dépassant tous les froids jamais vécus. Un tel grand froid à la limite du zéro absolu est pris en compte par le troisième principe d'après la formulation de Max Planck et non pas par le deuxième principe de thermodynamique qui traite des températures chaudes. Cela dit, il se pose deux problèmes :

- La mort thermique supposée par Boltzmann a été démentie.

En effet, elle ne risque pas de se produire, car l'univers n'est pas un système isolé. La mort thermique ne pouvait se produire que pour autant que l'on considérât l'univers comme un système isolé. Les premiers thermodynamiciens l'avaient considéré comme tel. Par exemple, Carnot prétendait que sa formule du deuxième principe s'appliquerait à n'importe quel moteur ayant le même fonctionnement : « *To see in its full generality the principle of production of work by heat, we must think of it independently of any particular agent ; we must establish arguments applicable not only to steam engines but to any imaginable heat engine whatever the working substance and whatever its manner of working*. »[275]Mais, ce sera Clausius qui appliquera ce fonctionnement à l'univers finalement. Maxime Nagels, Abdelkader Anakkar, Abdelhalim Guelzim affirmeront que *« Cette remarque fait écho à la notion d'Univers développée en 1865 par Clausius qui énonçait : "L'Energie de l'Univers est constante, l'entropie de l'Univers tend vers un Maximum." Ainsi, on peut se demander si l'Univers de Clausius constitue un système thermodynamique dans lequel les principes sont applicables. »*[276]Ce constat provoqua de l'anxiété chez Boltzmann qui en mourra.Eric Johnson raconte: *« But Boltzmann had already lived*

[275] J.S. Dudgale, Entropy and its physical meaning, Taylor and Francis publishers, University of Leeds, 1789, *Op.Cit*, p. 28-29

[276]Maxime Nagels, Abdelkader Anakkar, Abdelhalim Guelzim, *Le concept de système thermodynamique*, CETSIS 2021 – Colloque de l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes, *Op.Cit.*

more days than he could bear. And though he had planned to return to Vienna the following day, he decided that he would rather kill himself instead. Boltzmann set about the task of committing suicide. He was a kind man with a generous mind. This is his story and the story of his second law. »[277]Aujourd'hui, on sait que la mort thermique l'univers, qui ébranla Boltzmann, fut une mauvaise interprétation du second principe. En même temps, si on raisonnait par l'absurde, en supposant que la mort thermique puisse survenir, elle ne coïnciderait pas avec le grand froid jamais vécu dans toute l'histoire de l'univers. S'il fallait que la mort thermique advienne, le grand froid lui succèderait après que l'expansion ait continué à accroître le volume de l'univers faisant subséquemment chuter sa température. Or, la mort thermique ne risque pas de survenir.

- La nature pointe vers le sens inverse

Il faut suivre la nature pour éviter de se perdre, il faut l'écouter, au lieu de la commander ; il faut la comprendre. Ainsi, Prigogine préconisait le dialogue avec la nature, au lieu de lui dicter des lois. Il affirme : *« Dialogue en vérité et non monologue malgré son caractère apparemment unilatéral. Car l'enjeu n'en est pas de réduire la nature à une identité muette ; mais de construire la signification des questions que nous pouvons lui adresser. »*[278]Ce dialogue lui permettrait d'interpréter le langage de la nature, non pas comme des erreurs de nos observations. Malheureusement, l'homme est allé à l'inverse de ce que lui inspirait la nature. Il lui a dicté ses propres lois, au mépris du message que la nature elle-même lui adressait, s'installant dans une sorte d'anthropocentrisme qui s'ignore. Il a oublié le conseil de Francis Bacon. Le philosophe anglais affirme à propos :*« En effet, l'homme ministre et interprète de la nature, n'étend ses actions et ses connaissances, qu'à mesure de ses observations sur l'ordre de la nature ; en s'appuyant sur les œuvres ou sur l'esprit. Et il n'existe aucune force qui puisse arrêter ou briser la chaîne des causes ; et on ne triomphe de la nature qu'en lui obéissant. »*[279] Il convient donc d'écouter la nature pour suivre la vraie direction du grand froid qu'elle indique depuis le début de sa détente. Il s'agit d'interpréter simplement la courbe de la température en baisse continuelle, ce qui se comprend avec l'expansion. Plus il se détend, plus son volume augmente, et plus il se refroidit. La direction

[277]Eric Johnson, *Anxiety and the Equation.Understanding Boltzmann's entropy*. The MIT Press, Massachusetts, 2018, *Op.Cit*, p.2.
[278]Ilya Prigogine et Isabelle Stengers, *La nouvelle alliance, Op.Cit.*, p.29.p.26-27.
[279] Francis Bacon, *Nouvel organum ou règles véritables pour l'interprétation de la nature*, traduction et notes de Malherbe et J-M. Pousseur, PUF, Paris, 1986, p.87.

donc pointe vers le zéro absolu comme l'indique la formule Max Planck. C'est là véritablement le grand froid. La physique n'imagine pas un froid en deçà de cela, même pas théoriquement. Le zéro absolu c'est l'infini négatif en matière froid, si on peut le dire ainsi. La thermodynamique s'était trompée de direction en suivant une autre direction au lieu d'écouter la nature elle-même. On a imposé à la nature des lois issues des situations locales, par induction amplifiante. Ces lois ont été ingurgitées jusqu'ici sans examen critique. Or, la nature nous parle ; mais, très souvent nous ignorons son langage et nous sacrifions parfois nos intuitions à l'autel des vérités établies. Cependant, personne ne s'est jamais demandé si la physique avait raison de penser le grand froid, c'est-à-dire le froid absolu, en dehors du 0 K, température jamais atteinte et inatteignable en matière de froid. Ce serait contradictoire de penser autre chose plus froid que la référence elle-même. Or, les observations nous montrent que nous tendons vers le froid absolu longtemps théorisé par Max Planck. Cela signifie simplement que l'entropie de l'univers décroît. Il faut simplement se rendre à l'évidence. Le big chill se trouve donc dans l'autre extrême, là où l'univers nous indique des températures froides, à savoir lorsque la température tend vers le zéro absolu.

CHAPITRE 8 : ENJEUX PRATIQUES ET INTERETS HUMANITAIRES DES QUESTIONS LIÉES À L'ENTROPIE.

Dans ce chapitre, il est question de ressortir l'importance pratique de la présente réflexion sur l'entropie, pour éviter le paradoxe d'une théorie sans pratique stigmatisée par bien des auteurs tel Kwame Nkrumah dans son *consciencisme* qui affirmait que *« La pratique sans théorie est aveugle ; la théorie sans pratique est vide »*[280], toutes choses que nous rapportait déjà Emmanuel Kant plusieurs siècles auparavant, lorsqu'il affirmait : *« Des pensées sans matières sont vides ; des intuitions sans concepts sont aveugles. »*[281] Il s'agit donc de rendre notre théorie digne d'intérêt pratique, pour éviter de s'enfermer dans l'idéal théorique pur, à savoir : *connaître pour connaître*. Au XVI[e] siècle, Francis Bacon proposait déjà la rupture avec une science qui tournait en rond, en élaborant le projet d'une science qui soit utile à la société ou au public. Marie-France Blanquet affirme que *« Bacon prône la nécessité de donner aux sciences une dimension pratique, dans l'intérêt de la société toute entière, autrement dit, la nécessité de définir l'activité scientifique à l'intérieur d'un projet politique. »*[282]Ainsi, faire la science, être savant n'est pas un simple passe-temps, mais une mission envers l'humanité. C'est sauver le monde, se sauver soi-même avec ses frères humains. Cela nous renvoie aux propos de Luc Ferry quand il affirme : *« Comme le disent chacun à leur façon plusieurs penseurs contemporains, on ne philosophe pas pour s'amuser, ni même seulement pour comprendre le monde et se comprendre mieux soi-même, mais, parfois, " pour sauver sa peau " »*[283].D'où un projet planétaire écologique, médicinal, biomédical , ingénieurial et énergétique etc. Il est donc important de relever les enjeux pratiques de cette étude et de dégager ses intérêts multiformes Il s'agit concrètement de répondre à la question suivante : à quoi sert à l'homme une réflexion sur l'entropie ? Pour cela, nous allons proposer des pistes d'exploitation du principe d'entropie négative dans le quotidien de l'homme,

---

[280] Nkwame Nkrumah. *Le Conciencisme*. Éditions Présence Africaine, 1976, Paris, p. 97

[281]Emmanuel Kant, *Critique de la raison pure*, tr. fr. Barni et Archambault, Paris, Flammarion, 1900, p. 110.

[282] Marie-France Blanquet,*Francis Bacon (1561-1626),baron de Verulam, 1er vicomte de St Albans*, mis en ligne le 20 décembre 2009 in https://www.reseau-canope.fr/savoirscdi/societe-de-linformation/le-monde-du-livre-et-de-la-presse/histoire-du-livre-et-de-la-documentation/biographies/francis-bacon-1561-1626-baron-de-verulam-1er-vicomte-de-st-albans.html#contenu

[283] Luc Ferry, *Apprendre à vivre, Op.Cit,* p.10

dans la soutenabilité écologique, dans le domaine énergétique et dans l'industrie biomédicale, dans les questions de la mise en pratique de la supraconductivité du courant électrique.

8. 1. Produire des systèmes néguentropiques naturels et artificiels

8.1.1. Thermodynamique et écologie : renforcer et remédier à l'équilibre homéostatique de la planète

La lutte pour la sauvegarde et la préservation de l'écosystème constituent les plus grands défis du XXI[e] siècle. On ne peut plus faire la science sans penser à l'avenir de la maison commune. Dans cette section, nous allons essayer de mettre en relation les trouvailles de notre étude avec notre écosystème. Avant tout propos, il convient de noter que la terre constitue un système thermodynamique. Elle est très souvent considérée comme un système ouvert qui effectue des échanges thermiques avec le système le solaire. Dans une précédente étude, nous disions déjà que

> La terre, par exemple, est un système thermodynamique ouvert avec manifestation de la néguentropie. Car, la terre reçoit l'énergie qui vient du soleil, elle n'en garde que ce qui est nécessaire pour le développement des organismes vivants ; le reste de l'énergie est renvoyée dans l'atmosphère. Nous voyons là un maintien d'ordre dû à la compensation d'énergie. Il y a perte d'énergie par la terre du fait de la consommation de celle-ci par les organismes vivants ; il y a, par ailleurs, la réception d'une nouvelle énergie venant du soleil puis la réémission du surplus d'énergie dans l'atmosphère.[284]

Cela dit, la planète Terre est un système thermodynamique ouvert à entropie décroissante. Elle fonctionne exactement comme un système vivant qui réalise des activités métaboliques. Les situations de décroissance entropique dans les organismes vivants sont des situations métaboliques.

En effet, étymologiquement, nous avons montré que le terme métabolisme vient du mot grec μεταβαλλεινqui signifie simplement échange. Schrödinger le disait déjà en ces termes *: « The technical term is metabolism. The Greek word (μεταβαλλειν) means change or exchange. Exchange of what? Originally the underlying idea is, no doubt, exchange of*

[284]Jospin Brice FOE, *De la dynamique classique à la thermodynamique des processus de non-équilibre : une ontologie de la nature à partir de la physique, chez Ilya Prigogine* (mémoire), inédit, 2020, *Op.cit*, p.107.

material. »[285]Schrödinger montre donc que le métabolisme peut être considéré, au premier degré, comme un échange entre le système et l'environnement

En effet, la planète est entourée d'un dispositif naturel d'auto-régulation qui contrôle les fluctuations du comportement entropique comme dans un véritable organisme vivant. Elle récupère l'énergie qui vient du soleil sous forme d'énergie thermique. Ensuite, celle-ci est consommée par les plantes et autres organismes qui réalisent des synthèses par le truchement de celle-ci. C'est ce qui se passe dans la fonction chlorophyllienne. En effet, ce n'est pas la chaleur que le soleil envoie vers la terre, mais plutôt une énergie thermique, par le principe du rayonnement du corps noir (chaque corps noir émet des rayonnements électromagnétiques en direction d'un autre corps noir moins chaud que lui, qui en retour, les absorbe). C'est une des trois façons d'effectuer le transfert de chaleur en dehors de la conduction et de la convection. Cela dit, le soleil envoie des photons qui traversent le vide à la vitesse de la lumière ; lorsque ces derniers entrent en contact avec la matière, ils excitent les atomes qui se mettent à les chauffer. Et nous avons l'impression que c'est la chaleur qui est émise. Mais, non ; l'électron ne devient chaleur que lorsqu'il heurte une surface. C'est donc l'énergie thermique qui est émise par le soleil. Dans un article consacré à l'énergie thermique du soleil, on peut lire :

> Le Soleil émet de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Cette énergie est transportée par des paquets de particules : « les photons ». Il s'agit de particules extrêmement petites dont la masse est nulle. Ces photons se déplacent à une vitesse très rapide : la vitesse de la lumière. Quand un photon percute une particule de matière il lui transmet son énergie. Les atomes s'agitent et il en résulte une élévation de température.[286]

Après avoir reçu cette énergie thermique en provenance du soleil, à son tour, la terre renvoie la quantité qui est de trop hors de la couche d'ozone pour éviter que son entropie ne soit trop élevée. C'est pourquoi Schrödinger pense plutôt que les organismes vivants et les systèmes qui assurent des fonctions métaboliques ne se nourrissent pas d'énergie. Il préfère plutôt qu'on considère, de façon métaphorique, qu'ils se nourrissent d'entropie négative. Il affirme:

> Thus a living organism continually increases its entropy - or, as you may say, produces positive entropy - and thus tends to approach the dangerous state of maximum entropy, which is death. It can only keep aloof from it, i.e. alive, by continually drawing from its environment negative entropy - which is something very positive as we shall immediately see. What an organism feeds upon is negative entropy. Or, to put it less paradoxically, the essential thing in metabolism

[285]Erwin Schrödinger, *What is life ? The Physical Aspect of the Living Cell,* (first printing 1944), Cambridge University Press edition, 1967*, Op.Cit*, p. 70.
[286] https://www.ef4.be/fr/thermique/introduction.html

> is that the organism succeeds in freeing itself from all the entropy it cannot help producing while alive.[287]

Cette précédente réflexion vise faire à comprendre, en d'autres termes, que la nourriture de ces structures métaboliques, c'est l'entropie négative elle-même. Nous assimilons la terre à un système métabolique à cause de son caractère *suis generis*[288], c'est-à-dire un système d'auto-régulation dont les processus sont à l'image d'une synthèse métabolique réalisée par un vrai organisme vivant. Cependant, si la terre est un système thermodynamique ouvert capable de produire une entropie négative pour se maintenir grâce au processus d'auto-régulation ou homéostatique, il reste vrai que le système planétaire peut tomber malade si on brise l'équilibre homéostatique naturel. Alors le système ne peut plus se prendre en charge lui-même. Pour éviter cette situation désobligeante, il faut deux choses :

- Remédier au défaut d'équilibre homéostatique, et récupérer l'énergie solaire à l'avantage de la terre
- Diminuer les facteurs d'augmentation d'entropie à l'intérieur du système

L'équilibre homéostatique du système peut se briser si les facteurs naturels développés par le système planétaire sont éliminés par des agents agresseurs ou des comportements dangereux. Pour bien comprendre ce que nous voulons signifier, prenons le cas d'un organisme vivant et comparons-le au système planétaire. Par exemple, un organisme vivant s'adapte à son environnement en développant un comportement précis, un caractère ou plusieurs par rapport à l'information venant de l'environnement, ce qui lui permet de développer une morphologie propre, à l'avenant. Dans le lamarkisme développé par Jean Baptiste Lamarck, en guise de principe, il est dit que ce n'est pas le membre qui crée la fonction, mais c'est plutôt la fonction qui crée le membre. Or, la fonction est liée à l'environnement qui impose à l'organisme un comportement, à l'effet de survivre. Dans *Wikipédia,*à propos de la deuxième loi du lamarkisme, on peut lire ce qui suit : *« La production d'un nouvel organe dans un corps animal résulte d'un nouveau besoin survenu qui continue de se faire sentir et d'un nouveau mouvement que ce besoin fait naître et entretient. »*[289]Ainsi, il est démontré que, dans un environnement très froid,

[287]Erwin Schrödinger, *What is life ? The Physical Aspect of the Living Cell,* (first printing 1944), Cambridge University Press edition, 1967, *Op.Cit*, p. 71.
[288] La terre est vue comme une catégorie *suis generis* car elle est dotée d'un système d'auto-régulation qui a favorisé la naissance et le maintien de la vie sur terre. Elle réalise des fonctions presque métaboliques à grande échelle à partir des de l'énergie reçue du soleil.
[289]https://fr.wikipedia.org/wiki/Lamarckisme

l'organisme développe un mécanisme d'autoprotection en produisant beaucoup de pilosité. Ainsi, les populations des zones froides ont plus tendance à être velus. Ensuite, le caractère est acquis comme héréditaire après un certain temps, selon les lois propres à la génétique. Et à certain moment, il ne peut plus disparaître même lorsque l'environnement extérieur cesserait d'être froid.Du moins, ce qui nous intéresse, c'est le fait qu'un organisme produise de la pilosité sous certaines contraintes environnementales froides. La terre, elle aussi, a pu développer un tel système d'autoprotection contre l'énergie thermique qui vient du soleil. Initialement lorsque les émissions solaires partent du Soleil, ce n'est pas de la chaleur comme nous l'avons souligné plus haut. Ce sont des photons qui se propagent sous forme de rayonnement électromagnétique, capable de traverser le vide à la vitesse de la lumière. Joël de Rosnay nous édifiait déjà à propos :

> Le soleil émet en permanence, dans tout l'espace environnant, un rayonnement que nous appelons *ultraviolet, chaleur*, ou *onde radio* mais qui est en réalité de nature unique : *c'est le rayonnement électromagnétique*. Il se propage dans l'espace vide à une grande vitesse et contient, suivant sa longueur d'onde et sa fréquence, une certaine quantité d'*énergie utilisable*. Cette énergie se trouve sous forme de petits « paquets » que l'on appelle des *photons*.[290]

Ce n'est donc pas la chaleur que le Soleil émet vers nous, mais le rayonnement électromagnétique sous forme de photons. On l'a démontré en parlant du rayonnement du corps noir. C'est lorsque ces photons frappent une surface qu'ils sont transformés en chaleur en excitant ses atomes. Pourtant, la terre dans son système d'auto-régulation a tout prévu. La végétation de la terre les consomme comme une nourriture, une fonction vitale, à savoir : la photosynthèse qui est synthèse de ces photons, comme son nom l'indique. On parle de la fonction chlorophyllienne pour les plantes à chlorophylle.

[290] Joël de Rosnay, *Les origines de la vie, de l'atome à la cellule*, Seuil, Paris, 1966, pp. 48-49

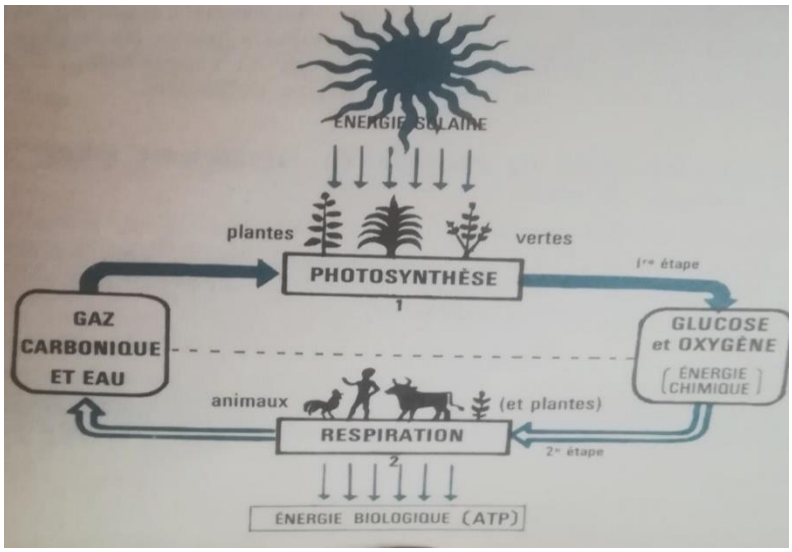


Figure 20 : Illustration comment l'énergie émise par le soleil n'est initialement de la chaleur mais un aliment pour la végétation. Mais ce rôle est détourné par le ravage écologique.

Quand ces rayons frappent la terre ou sur une surface, ils deviennent de la chaleur : et cela augmente l'entropie de la terre. La terre devient alors un système très chaud ne pouvant plus réguler son entropie pour qu'elle soit négative. Couper les arbres par exemple, détruire la végétation, détruire l'environnement contribuent à rompre l'équilibre homéostatique naturel que la terre a développé de façon naturelle pour lutter contre l'énergie thermique venant du soleil. L'*effet de serre* peut être une des conséquences de cette brisure de l'équilibre homéostatique de la terre. En dehors de cette destruction de l'auto-régulation naturelle, il faut également diminuer les facteurs d'augmentation d'entropie à l'intérieur du système.

- Diminuer les facteurs d'augmentation d'entropie à l'intérieur du système

On sait que le soleil est, par nature, une source thermique très importante. Il constitue le premier facteur d'augmentation de l'entropie par l'énergie thermique qu'il émet sous forme de chaleur. Face à cette source thermique, l'homme ne peut rien. Que peut-il face aux forces naturelles, étant lui-même un infime élément de cette nature ? Il se contente juste de contourner les effets néfastes des forces de la nature. Cependant, au-delà des sources de chaleur externes auquel l'homme ne peut rien, il y aussi les sources de chaleur internes qui relèvent de sa responsabilité. L'homme peut augmenter dangereusement l'entropie en créant des très grandes sources de chaleur. On peut citer les industries thermiques qui dégagent des grandes chaleurs. Cela fait en sorte que le taux de chaleur à l'intérieur soit très élevé. Quand on ajoute à cela

l'énergie thermique venant du soleil, l'entropie peine à décroître malgré le mécanisme d'auto-régulation naturelle que la terre s'est inventée. Il faut donc éviter de créer les sources thermiques internes. On peut aussi citer :

- Les feux de brousse qui, non seulement détruisent le système de protection naturelle constitué des plantes, des arbres, de la végétation qui absorbent les rayons de soleil, mais en plus, ils constituent des sources thermiques internes.
- Il faut éviter la pollution par les fumées des moteurs et autres fumées. Ces fumées sont des énergies inutiles qui ne sont pas récupérables, et donc expulsées des moteurs ou incapables de subir une oxydo-réduction de nature exothermique. Elles deviennent donc des déchets polluants dangereux pour la couche d'ozone. Pour un système comme la terre, la couche d'ozone représente la frontière où s'effectuent les échanges. C'est le lieu par excellence des dissipations d'énergie. L'énergie requise reçue pénètre par là et le trop plein d'énergie est rejeté également par là.
- Usage des armes chimiques ou nucléaires qui ont des effets dévastateurs sur la couche d'ozone, etc.

En effet, la question de la préservation écologique doit être mise au centre pour résorber les problèmes de croissance entropique. Il faut savoir que la nature combat contre la croissance entropique en essayant de trouver les mécanismes de production d'une entropie négative. C'est un système de maintien et de régulation semblable à l'homéostasie pour les organismes vivants. Mais, si l'agression est supérieure au dispositif d'auto-régulation, la nature ne pourra pas résister. Il faut donc éviter d'aboutir à des situations où on ne peut plus rien faire. Il n'est pas dit, cependant, que l'homme doit abandonner son projet civilisationnel qui est un projet exaltant, important à l'avenant. Mais, il ne doit pas hypothéquer son avenir. Faire la science, philosopher, aujourd'hui ne sont pas des passe-temps ; il ne s'agit plus comprendre simplement le monde, il s'agit de le comprendre pour sauver sa peau. Jean Zin affirme ceci à propos : *« On ne peut nier la puissance entropique de l'humanité dévastant de vastes territoires, épuisant ses ressources et justifiant largement les protestations des écologistes. Cependant, il serait absurde de réduire l'humanité à ses capacités de destruction sans prendre en compte la construction de* ***civilisations*** *formidablement organisées. »*[291]Cela dit, on ne peut pas, d'un simple revers de la main, balayer le

[291] Jean Zin, *De l'entropie à l'écologie*, mis en ligne le 22 février 2011, https://jeanzin.fr/2011/02/22/de-l-entropie-a-l-ecologie/

projet civilisationnel de l'homme, tels bâtir des pyramides (comme on l'a fait à l'ère pharaonique en Egypte), construire des immeubles, conquérir l'espace, exploiter les énergies naturelles, bref domestiquer son environnement pour mieux s'épanouir comme être de culture. Mais, il doit faire attention à ne pas couper le fil sur lequel l'édifice tout entier tient, à savoir endommager gravement l'équilibrede l'écosystème.

En supprimant certains espaces pour conquérir l'univers, l'homme doit trouver un mécanisme de compensation. C'est pourquoi, il doit replanter les arbres, éviter de raser tout une végétation entière dans une région à défaut d'augmenter une entropie locale. Il doit, en revanche protéger certaines forêts déclarées comme patrimoine de l'humanité. Après avoir relevé l'importance et les enjeux planétaires et écologiques de l'entropie, il s'agit maintenant de revenir à l'homme.

8.1.2. Thermodynamique du corps humain : de la nature extérieure à la nature intérieure

Le grand renversement que Socrate imprime à la philosophie, en rapport avec l'oracle de Delphes, est connais-toi toi-même. Il s'agit de faire que tout projet de reconnaissance soit anthropocentré. Il s'agit de mettre l'homme lui-même au centre, non plus seulement la nature extérieure. Et quand bien même il s'intéresserait à la nature extérieure, c'est en vue du bien-être de la nature intérieure qui est en lui. Le revirement socratique consiste donc à la maîtrise de la nature intérieure.

De prime à bord, il important de rappeler que le corps humain fonctionne exactement comme une machine : on introduit une énergie, il la consomme sans totalement l'utiliser, car il y a des marges d'énergie inutile comme dans n'importe quel moteur avec un rendement qui n'est jamais maximal. A ce propos, nous avons dit qu'il est démontré que, dans un moteur, le maximum de rendement théorique est de 50%, tandis que dans la pratique, les meilleures machines arrivent à 40%. Les pertes ou énergie inutiles de l'organisme sont rejetées vers l'extérieur sous forme de déchets. Ce fonctionnement est simplement naturel à tout système thermodynamique. Car, tout système thermodynamique est un système qui réalise un travail par le truchement d'une énergie introduite en son sein ou simplement une énergie qu'elle contient dite énergie interne. L'organisme vivant est, de ce fait, un système thermodynamique qui réalise une thermodynamique particulière, à savoir la biothermodynamique que nous pouvons encore

appeler la thermodynamique du corps humain. Yi Fang Yang affirme que: *« A living being as a whole represents an extermely orderly state of being and must be an open system for long-time. »*[292]

Nous avons dit que le système vivant est un système ouvert particulier, en ceci qu'il développe essentiellement une thermodynamique avec production d'entropie négative (en fait, dans les systèmes ouverts non vivants, l'entropie peut être positive ou négative, selon les cas, ce qui n'est pas le cas pour les systèmes vivants où elle est toujours négative). Pour Erwin Schrödinger, à la question de savoir : *« de quoi se nourrit un organisme vivant ? »*, il pense qu'il se nourrit, non pas d'énergie, mais d'entropie négative. C'est vrai que c'est une figure de pensée (la métonymie notamment) où on prend la cause pour l'effet, l'objet pour la finalité etc. Car, toute énergie introduite dans un organisme vivant ne permet pas absolument à l'entropie de décroitre. Quelle que soit la quantité d'énergie venant de l'environnement, si elle ne permet pas une décroissance entropique, l'organisme tomberait dans la décrépitude de la mort thermique. C'est le cas d'un organisme malade qui, malgré l'énergie reçue, garde une entropie élevée. Finalement, ce n'est pas l'énergie que l'organisme recherche, mais l'entropie négative. Schrödinger affirme:

> What then is that precious something contained in our food which keeps us from death? That is easily answered. Every process, event, happening - call it what you will; in a word, everything that is going on in Nature means an increase of the entropy of the part of the world where it is going on. Thus a living organism continually increases its entropy - or, as you may say, produces positive entropy - and thus tends to approach the dangerous state of maximum entropy, which is death. It can only keep aloof from it, i.e. alive, by continually drawing from its environment negative entropy - which is something very positive as we shall immediately see. What an organism feeds upon is negative entropy. Or, to put it less paradoxically, the essential thing in metabolism is that the organism succeeds in freeing itself from all the entropy it cannot help producing while alive.[293]

Ce qui est intéressant, ici, c'est le fait que Schrödinger pense que l'entropie négative soit la nourriture même de notre corps. Car, ce qu'il y a dans la nourriture que nous consommons, c'est de l'entropie positive. Et le métabolisme réussit à se libérer de toute entropie qui l'embêterait tant qu'elle vit. Il est donc important de prendre conscience de la production d'entropie négative dans le corps humain.

---

[292]Yi-Fang Chang, *Entropy decrease in isolated systems: theory, facts and test, in International Journals of Fundamental Physical Science (IJFPS) Vol 10, N^0 2, Op.cit.*

[293]Erwin Schrödinger, *What is life ? The Physical Aspect of the Living Cell,* (first printing 1944), Cambridge University Press edition, 1967, *Op.cit,* p. 71

Aux antipodes de la réduction entropique se trouve la maladie qui, en revanche augmente drastiquement la production d'entropie positive, synonyme de mort thermique. Il faut donc lutter contre la maladie qui est une métaphore de l'augmentation d'entropie en revenant rapidement de la maladie à la santé. Cette dernière est une situation de production d'entropie négative dont le corps a besoin. Yi-Fang Chang ajoute que: *« A living being's death represents a transformation to a state of total disorder, while sickness is a state of local disorder and a state of recoverong from sickness is marked by the return to the higher order health. The order parameters are thus health targets. »*[294] Il s'agit donc de rechercher toujours la santé qui constitue le parangon de l'entropie negative.

Concrètement, on peut développer l'entropie négative qui est un état d'organisation interne très élevée à travers la bonne humeur. La bonne humeur permet au corps humain d'unifier le corps et l'esprit. Il permet à l'organisme de maintenir une organisation interne très élevée qui correspond à l'entropie négative dont le corps a besoin. En retour, l'entropie négative renforce le système immunitaire. Et le corps humain se maintient à l'abri de nombreuses maladies qui pourraient faire croître son entropie. YiFang Chang poursuit, en disant:

> Qigong [which is meditativ activity] requires that one must be calm and good-natured, which is a more arderly state for a person. Clinical practices show that the pratice of Qigong causes a reduction in human metabolism. This reduction seems to the possibility that human ideas and similar thought forms also entropy decrease, and achives an ordering within a living system that could cure sickness and increase the internal immune system strength.[295]

L'entropie négative est donc presque la métaphore de la vie. Sans une production d'entropie négative qui maintient l'organisation interne du corps humain, la vie n'est pas possible. Tout de suite, c 'est la mort. La thermodynamique médicinale est en train de tester actuellement comment l'entropie négative peut soigner les cancers. Un cancer correspond à une multiplication anarchique des cellules. L'Institut National du Cancer définit le cancer comme suit :

> Le cancer est une maladie provoquée par la transformation de cellules qui deviennent anormales et prolifèrent de façon excessive. Ces cellules déréglées finissent parfois par former une masse qu'on appelle tumeur maligne. Les cellules cancéreuses ont tendance à

[294]Yi-Fang Chang, *Entropy decrease in isolated systems: theory, facts and test, in International Journals of Fundamental Physical Science (IJFPS) Vol 10, N^0 2, Op.cit*

[295]Yi-Fang Chang, *Idem*

> envahir les tissus voisins et à se détacher de la tumeur initiale. Elles migrent alors par les vaisseaux sanguins et les vaisseaux lymphatiques pour aller former une autre tumeur (métastase)[296]

Cette multiplication anarchique des cellules trouble l'ordre et l'organisation interne qui sont l'une des caractéristiques fondamentales d'un système vivant qui est un système homéostatique. L'entropie négative, en tant qu'elle développe une organisation très élevée du corps, pourrait être envisagée pour soigner ces cancers en faisant que l'organisme revienne à l'organisation. Cette hypothèse est en train d'être envisagée par les physiologistes. A ce propos, Yi-Fang Chang : affirme *« The metabolism is entropy decrease in isolated system. These practice methods all are to benefit the control of consciousness. Probably, some ways are propitious to cure of cancer. »*[297]

En sus de ce que nous venons de dire, on pourrait également ajouter la pratique du sport. Le sport permet à l'organisme de rejeter les énergies inutiles accumulées, celles qui n'ont pas servi au processus métabolique, puisque toute l'énergie introduite n'est jamais utilisée. Ce trop-plein d'énergie provenant des glucides, en tant que principale source d'énergie du corps, se trouve généralement stocké sous forme de glycogène et peut devenir dangereux si on ne fait pas du sport. Il peut se transformer en masse de graisse et faire croître l'entropie. Un individu qui a un trop-plein d'énergie stockée est à la limite de la production positive d'entropie. On peut lire sur la page de l'Hôpital Universitaire International Khalifa ce qui suit : «

> Le corps humain dispose également de la faculté de stocker le surplus de glucose sous forme de glycogène dans les muscles et dans le foie. Quand les réserves de glycogène sont saturées, notre corps stocke le glucose en excès sous forme de tissu adipeux communément appelé graisse ou masse grasse, il en ressort qu'une alimentation riche en sucres expose à une accumulation de la masse grasse[298]

En effet, ce que l'on nomme graisse n'est finalement que les réserves de glucose stockées sous forme de glycogène comme réserve d'énergie. Ces réserves peuvent, à un moment donné, provoquer la croissance entropique en brisant le système homéostatique. Ainsi, une grande quantité de cette réserve provoque un mal-être, des étouffements, des souffrances respiratoires,

---

[296] Institut National du Cancer, https://www.e-cancer.fr/Dictionnaire/C/cancer

[297]Yi-Fang Chang, *Entropy decrease in isolated systems: theory, facts and test, in International Journals of Fundamental Physical Science (IJFPS) Vol 10, N^0 2, Op.Cit.*

.[298]Hôpital Universitaire International Khalifa, *Comment le corps se fournit-il en énergie durant la période de jeûne ?* inhttps://www.hck.ma/fr/info-sante/comment-le-corps-se-fournit-il-en-energie-durant-l/ ?

voire des transpirations gênantes, preuve que l'organisme voudrait les évacuer. Car, il en est de l'organisme comme du système thermodynamique planétaire. Il reçoit ce qui lui faut pour que les organismes vivants réalisent leur photosynthèse tout en rejetant le trop-plein (c'est ce que les thermodynamiciens appellent les phénomènes de dissipations), de même l'organisme reçoit ce dont il a besoin en évacuant les excès. Or, ce qui différencie le système thermodynamique que constitue le corps humain des autres systèmes est que les excès ne sont pas directement dissipés comme le font les systèmes inanimés, mais ils sont d'abord gardés pour prévenir les situations de disettes. Si ces excès s'accumulent, la situation devient problématique avec des facteurs très élevés de risque de maladie. En temps normal, à défaut de disette et de pénurie, le sport doit permettre l'évacuation de tous ces excès.

Comme recette quotidienne, on peut également proposer de boire régulièrement de l'eau, car l'eau à température ambiante a une température inférieure à celle du corps humain. Ainsi, l'eau pourrait faire baisser rapidement l'entropie du corps dès son introduction dans l'organisme, parce que l'eau fait partie des aliments non transformés qui sont directement assimilés par l'organisme.

L'eau peut faire baisser l'entropie lors de la prise de notre bain. Une eau à température ambiante peut refroidir le corps en cas de température très élevée.

8.1.3. De « la soutenabilité écologique »: enjeux d'un rapport équilibré entre biosphère, écosphère et éconosphère

Dans cette section, il s'agit de venir en aide au mécanisme d'auto-régulation du système thermodynamique planétaire. En effet, nous avons signalé que les risques engendrés par le projet civilisationnel sont énormes. Autant le dire, l'homme se comporte parfois comme un agresseur ou un agent destructeur de l'équilibre du système thermodynamique de notre planète qui se trouve être pourtant bien réglé naturellement. Nous avons montré, en revanche que l'homme étant, par définition, un être de culture qui aspire au mieux-être, doit faire attention à ne pas rompre le fil sur lequel il tient ou plus simplement le fil sur lequel tout l'édifice tient. Or, il se trouve que l'agression causée par l'homme sur l'environnement ait déjà affecté la couche d'ozone. C'est ce qu'on peut lire dans le document des Nations Unies sur la couche d'ozone à l'occasion de la célébration de la Journée internationale de la protection de la couche d'ozone.

> La couche d'ozone est un mince bouclier de gaz dans l'atmosphère terrestre qui protège la planète en absorbant les rayons ultraviolets (UV) du soleil, et qui aide ainsi à préserver toute vie sur la planète. Mais la couche d'ozone n'est pas à l'abri des activités humaines nocives. Elle a été détruite par un ensemble de gaz à effet de serre d'origine humaine connus sous le nom de substances appauvrissant la couche d'ozone (SACO), parmi lesquelles les chlorofluorocarbones, que l'on peut trouver dans des produits d'usage courant tels que les climatiseurs, les réfrigérateurs et les bombes aérosol.[299]

On peut comprendre que le projet civilisationnel de l'homme comporte en même temps des avantages et des inconvénients. Ainsi, on se retrouve dans une logique renversée où, en voulant hyper-vivre, il se retrouve à scier la branche sur laquelle il est assis. Il faut surtout compter avec les logiques de production de la société capitaliste qui s'oppose souvent aux logiques de préservation de la vie. Ainsi, il se crée une sorte de scission entre l'éconosphère et la biosphère. Il s'agit de rétablir également ce juste rapport entre les deux en sachant que l'éconosphère est un sous-système de la biosphère tant et si bien que si la biosphère est endommagée, l'écosphère et l'éconosphère s'écroulent, en conséquence.

Pour une bonne entrée en matière, il importe de définir les notions de biosphère, écosphère et éconosphère. Vladimir Ivanovitch Vernadski est le premier à saisir les termes biosphère et écosphère pour leur donner un sens clair et précis dans les années 1926 dans une recherche doctorale. On peut lire ceci :

> Dans ce cadre sémantique, l'écosphère apparaît comme l'ensemble des organismes vivants et de leurs habitats, produits par ces mêmes organismes, au sein d'une biosphère déjà existante produite par les microorganismes. La biosphère et l'écosphère caractériseraient ainsi ces deux «champs thermodynamiques» emboîtés l'un dans l'autre que Vernadsky lui-même a nommés : (1) Le «Domaine du vivant» (ou champ thermodynamique de stabilité vitale, habitat de la matière vivante), à savoir la biosphère, et (2) La «Maison du vivant» (ou champ thermodynamique de l'existence vitale, habitat des organismes vivants), qui prendrait ici le nom d'écosphère, terme inexistant à son époque.[300]

La biosphère est donc la grande sphère où se développe la vie, caractérisée à raison comme le domaine du vivant, marquée par la thermodynamique de stabilité vitale. Alors que l'écosphère c'est la maison du vivant, caractérisée par la thermodynamique de l'existence vitale. On peut remarquer que cette dernière sphère se loge dans la première. Mais dans tous les cas, ils constituent le lieu de la vie. Ce lieu est maintenu par la production de la néguentropie. On peut encore lire dans la même section à Wikipédia :

> La Biosphère est le système écologique global, auto-entretenu, qui intègre tous les êtres vivants et les relations qu'ils tissent entre eux et avec les compartiments que sont la lithosphère (les

[299] https://www.un.org/fr/climatechange/preserving-the-ozone-layer
[300] *https:// fr.wikipedia.org/wiki/Biosphère*

> roches), l'hydrosphère (l'eau), et l'atmosphère (air), dans un métabolisme qui transforme sans cesse la surface de la Terre en recyclant ou stockant les éléments et en créant de la complexité et de la néguentropie là où sans la vie, il n'y aurait que de l'entropie.[301]

Il ressort que le principe de fonctionnement de la biosphère est la néguentropie, car c'est cela qui lui vaut de développer la vie et qu'elle soit considérée comme étant le domaine exclusif du vivant.

Par ailleurs, la notion d'éconosphère, quant à elle, se veut être un projet pluridisciplinaire qui met au centre des débats : l'assainissement de l'économie humaine dont les avatars ont perturbé en grande partie l'écologie planétaire, à savoir l'écosphère et la biosphère. Les logiques économiques issues du monde supra-libéral ont favorisé, non seulement une vision individualiste (l'individu ne se soucie guère du bien commun, mais de son gain individuel), mais aussi des idéologies de productivité marchande à l'extrême (société qui se définit par le rapport production-consommation). D'où une industrie polluante. On peut lire sur un site de diffusion du projet éconosphère que : *« Le néolibéralisme veut enfermer le monde dans une bulle marchande.Les Éconosphères portent un projet tout différent… Débattre et confronter des points de vue sur la façon de remettre la sphère des activités économiques à sa juste place, au service de la société, du social et de la démocratie. »*[302]

Il faut donc mettre en dialogue biosphère, écosphère et éconosphère, sachant que les deux premiers sont essentiels au vivant ; ils sont si précieux qu'ils constituent une exclusivité dans l'univers tout entier. Les acteurs économiques doivent prendre conscience de cette préciosité et assainir les logiques de production. L'Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France (ARB îdF) publie :

> La crise écologique est inédite pour le monde de l'économie : elle va jusqu'à remettre en cause les dogmes les plus intouchables de la croissance et du marché libre de toute contrainte réglementaire. Car, comme le rappelle l'économiste Jean-Marie Harribey, parmi d'autres, "le marché est caractérisé par son incapacité à produire des normes autres que celle de la rentabilité". Or, nous l'avons vu au chapitre 1, le maintien de la biosphère est un impératif pour nos sociétés[303]

---

[301] *Ibidem*

[302] https://www.cncd.be/+-Econospheres

[303] ARB (l'Agence régionale de la biodiversité en Île-de- France) (Département biodiversité de l'Institut Paris Region), *Économie et biodiversité : produire et consommer dans les limites de la biosphère (2015)*, mis en ligne le 12 mai 2015 in https://www.arb-idf.fr/nos-travaux/publications/economie-et-biodiversite-produire-et-consommer-dans-les-limites-de-la-biosphere-2015/

La crise écologique engendrée par l'univers d'un ensauvagement ultralibéraliste marchand affecte gravement la stabilité vitale de la biosphère en tant que domaine du vivant. Ce sont les êtres vivants tout entiers qui sont menacés. Au lieu que la thermodynamique de stabilité vitale produise la néguentropie qui lui est propre, le déséquilibre engendre la production de l'entropie positive. La conséquence, c'est la menace qui pèse sur l'environnement avec pour effet immédiat le réchauffement planétaire, et les maladies qu'il draine, tels que les cancers. En revanche, la biodiversité qui se nourrit d'énergie solaire comme aliment pour réaliser la photosynthèse se trouve dévastée. A l'issue, les rayons de soleil commencent à frapper la surface de la terre en se transformant en chaleur. Or, ils étaient destinés à être consommés par la végétation terrestre. Toutes choses qui augmentent l'entropie. Or si la biosphère est étouffée par une production insuffisante de néguentropie au profit de l'entropie, cela implique la décrépitude du vivant. Le tableau ci-dessous démontre la dépendance de l'éconosphère vis-à-vis de la biosphère.

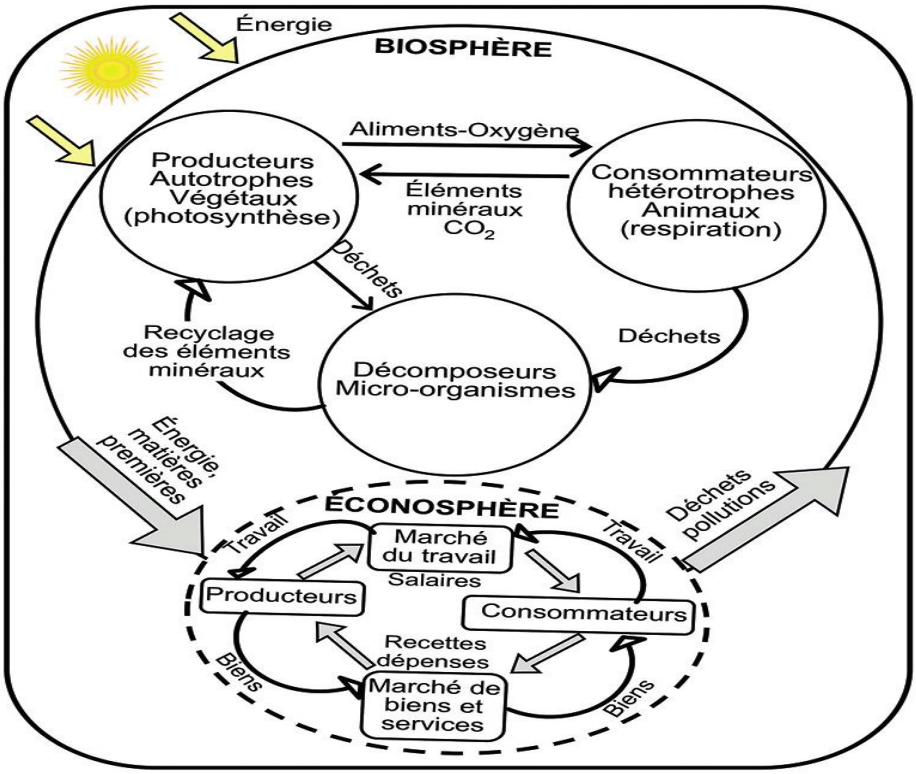


Figure 21 : illustration l'incrustation de l'éconosphère dans la biosphère.

La figure ci-dessus expose le fait que l'éconosphère, qui est un sous-système du système thermodynamique planétaire, est la cause première de la dégradation de la biosphère parce que c'est elle qui exploite les énergies naturelles (matières premières notamment) et rejette les déchets à l'intérieur du système, créant un *effet de serre*. Il y a donc un risque de production d'entropie dans ce cas de figure qui est devenu de règle aujourd'hui. L'épuisement de ces énergies lui-même est aussi objet d'inquiétude. Car, elles ne se renouvellent pas sur un battement de cil, mais au contraire, elles le font sur des cycles très longs. Sur ces entrefaites, l'écologie se dégrade et dépérit.

De plus, la ruée vers les énergies fossiles est une *causa belli*. La plupart des guerres s'expliquent parles positionnements par rapports aux intérêts géostratégiques (courses aux minerais, aux énergies fossiles, aux matières premières). L'homme, qui tient pourtant sur un fil, ne se rend pas compte de sa fragilité dans l'univers et son privilège exclusif, comme unique être dans toute cette immensité de l'univers, du moins jusqu'à l'état de nos connaissances, à bénéficier de la vie. Et,en fait de vie, il s'agit d'une vie intelligente. Il est donc urgent de prendre conscience que notre système est un système thermodynamique vivant ou presque. Comme tel, par analogie à un véritable organisme vivant, il réalise des métabolismes. Si nous détruisons les principes fondamentaux et fondateurs de ce métabolisme de la thermodynamique du domaine du vivant (biosphère) ou encore les principes fondamentaux et fondateurs de la thermodynamique de l'existence du vivant (écosphère), ce qui advient à la thermodynamique des systèmes non-vivants nous adviendrait : la mort thermique.

Nous proposons donc un rapport plus équilibré entre l'éconosphère et la biosphère. Il s'agit de donner à l'économie des finalités plus humaines et plus écologiques. Sinon, en voulant se sauver tout seul, on risquerait de renverser la barque commune qui nous transporte tous.

Pour ce qui est des déchets, après avoir établi un dialogue plus conscient et plus responsable sur la préservation de la biosphère en tant que thermodynamique de stabilité vitale, il importe que les industriels soient amenés à ne plus larguer les déchets polluants ou non recyclables dans la nature. Ces objets devraient plutôt être traités et remastérisés à toutes fins utiles. La création des usines de récupération et de transformation chimique de la matière plastique doit être promue à des fins humanitaires. Les énergies non renouvelables doivent être préservées et exploitées avec responsabilité. Il s'agit pour l'éconosphère de faire allégeance à la

biosphère et à l'éconosphère, comme la barque qui la transporte et dont elle doit être respectueuse et plein d'égards. C'est cela, sauver sa peau.

Après avoir montré les enjeux et les intérêts multiformes de la maîtrise de la thermodynamique, ainsi que ses applications sur le fonctionnement de la planète, sur le comportement de la société, sur la vie de l'homme et le fonctionnement de son corps, il importe de donner les perspectives ou encore des pistes de recherches pour la mise œuvre de ces acquis.

8.2. Des perspectives et orientations pour une capitalisation des acquis en thermodynamique

8.2.1. Pollution et transition énergétique pour une exploitation optimale de l'énergie solaire

La précédente réflexion nous a permis de retenir deux choses au moins :

- Les ressources naturelles (matières premières) se feront de plus en plus rares à cause de leur surexploitation et le renouvellement très lent.
- Ces énergies elles-mêmes constituent des déchets toxiques pour l'atmosphère et les autres sphères du vivant (biosphère et écosphère).

La solution est donc de se tourner vers des énergies inépuisables, pour résoudre le premier problème, et de rechercher les énergies à 100 % non polluantes, pour résoudre le second problème. Où trouver donc cette solution magique ?

Comme nous l'avons dit et nous continuons de le dire, il s'agit de suivre la nature, et non de lui imposer nos propres lois. Le soleil est un des signes que la nature fait à l'homme sans que ce dernier ne comprenne son langage. Si cette énergie était suffisamment exploitée, ce qui n'est pas le cas, elle serait moins dangereuse pour l'homme (nous avons montré que la terre la reconvertit comme nourriture pour sa verdure et sa végétation), et serait moins onéreuse par rapport aux autres énergies qui sont très discutées parce qu'elles sont de plus en plus rares. Mais, l'homme n'a pas suffisamment investi sur ce précieux don naturel. En effet, l'énergie solaire dépasse, de loin, toutes les autres formes d'énergies (combustibles fossiles, énergies renouvelables etc.). Nous pouvons lire, dans cet article signé de la rédaction du *Magazine Meilleurtaux,* ce qui suit : *« Le soleil est une source d'énergie remarquable. En moins d'une heure, l'astre est capable de fournir à la Terre toute l'énergie, dont l'humanité a besoin pour*

toute une année. »[304] En une heure seulement, l'énergie émise par le soleil suffit à toute la terre, pendant une année entière. Imaginons quelle quantité le soleil pourrait-il fournir comme énergie en une journée, en un mois ou en une année ! Mais, ce qui est triste est que cette énergie est très sous-exploitée : *« Un comparatif d'énergie révèle que le solaire représente seulement 0,7 % de la production énergétique dans le monde, contre 78 % pour les combustibles fossiles et 19 % pour les autres formes d'énergies renouvelables (hydraulique, éolien, biomasse…). Son potentiel est pourtant remarquable. »*[305] La citation fait état d'une exploitation de moins de 1% de l'énergie fournie par le soleil, ce qui est très insignifiant. C'est la preuve parfaite que cette énergie est sous-exploitée. Or voici les conséquences d'une bonne exploitation de l'énergie solaire :

1. Une baisse du réchauffement et ou de l'entropie par la consommation maximale de l'énergie solaire
2. Une baisse de l'entropie par la non-production des déchets polluants
3. Une disponibilité de l'énergie

Nous pouvons argumenter ces aspects point par point pour en vérifier la pertinence :

- Une baisse du réchauffement et ou de l'entropie par la consommation maximale de l'énergie solaire

La baisse du réchauffement s'expliquerait par le fait que le soleil est un corps noir, c'est-à-dire qu'il est capable d'émettre des rayonnements thermiques et d'en absorber. Il émet donc des rayonnements qui envahissent tout le système solaire et qui arrivent sur la terre sous forme d'énergie thermique. C'est cette énergie thermique qui est exploitée comme énergie solaire. Le défaut d'exploitation fait que lorsque les photons frappent la surface de la terre, cela engendre la chaleur. Par contre, les dispositifs de capture de ces rayonnements empêchent la chaleur d'augmenter. L'exploitation de cette énergie à grande échelle pourrait permettre de réduire considérablement l'entropie du système planétaire. Il est donc important d'approfondir cette technologie pour optimiser l'exploitation de l'énergie solaire et permettre l'accès de tous à l'électricité. En effet, une bonne partie du monde ne bénéficie pas de l'électricité surtout en

[304](La rédaction),*L'énergie solaire est-elle encore sous-exploitée ?in Meilleurtaux,* mis à jour le 14 septembre 2020, inhttps://energie.meilleurtaux.com/actualites-energie/2020-septembre/energie-solaire-est-elle-encore-sous-exploitee.html
[305]*Ibidem*

Afrique subsaharienne. Dans un document traitant du potentiel d'énergie solaire en Afrique, on peut lire :

> L'Afrique détient le triste record du taux de consommation d'électricité par habitant le plus bas du monde. La consommation d'électricité par habitant en Afrique subsaharienne (Afrique du Sud exclue) est de 180 kWh, contre 13 000 kWh par habitant aux États-Unis et 6500 kWh en Europe. Le continent a également le niveau d'accès à l'électricité le plus faible du monde : plus de 640 millions d'Africains n'ont pas accès à l'énergie, ce qui correspond à un taux d'accès d'environ 40 %, selon une enquête de la Banque africaine de développement.[306]

De ce qui précède, il est donc question d'exploiter au mieux l'énergie thermique pour faire d'une pierre deux coups : réduire l'entropie de système thermodynamique planétaire en exploitant l'énergie solaire et permettre l'accès de tous à l'électricité.

- Une baisse de l'entropie par la non production des déchets polluants

Par ailleurs, contrairement aux combustibles fossiles qui, non seulement se renouvellent très lentement et en plus qui sont encore considérés comme l'or noir en même temps qu'ils constituent la principale cause des guerres dans le monde, il faut promouvoir l'énergie solaire qui, elle, ne constitue pas une source de pollution pouvant faire augmenter l'entropie. Le pétrole demeure parmi les énergies les plus polluantes de la planète dont le cycle de renouvellement est, en plus, très long. Et pourtant il est l'énergie la plus convoitée. Laurent Goetschel et Didier Péclard affirment que :

> Depuis des siècles, sociétés et Etats ont utilisé certaines ressources naturelles afin de promouvoir leurs intérêts et de poursuivre leurs objectifs politiques. Jusqu'à la fin du XVIII^{e} siècle par exemple, le bois a été d'une importance primordiale pour les puissances navales. De nos jours, c'est le pétrole qui fait la une des médias internationaux, aussi bien comme élément indispensable à la politique des grandes puissances que comme source de conflit.[307]

Il serait donc urgent de se tourner vers l'énergie solaire qui est renouvelable et accessible. Et en plus ; c'est une énergie verte, à savoir une énergie qui ne pollue pas l'environnement. L'entropie du système planétaire court donc moins de risques de connaître une augmentation.

- Une disponibilité de l'énergie

La question de la disponibilité de l'énergie solaire est peut-être l'aspect le plus important. Elle est disponible dans la mesure où elle est inépuisable, c'est-à-dire qu'elle sera toujours

[306] https://fr.linkedin.com/pulse/afrique-un-potentiel-energie--solaire-sous-exploité-ofty

[307]Laurent Goetschel et Didier Péclard, *« Les conflits liés aux ressources naturelles. Résultats de recherches et perspectives »*, Annuaire suisse de politique de développement, 25-2 | 2006, 95-106.

présente. Elle ne risque pas de manquer. Ce sont nos moyens d'exploitation qui peuvent nous limiter. Si cette énergie était suffisamment exploitée, on aurait plus besoin des énergies qui demandent des efforts et des sacrifices énormes d'extraction, de transport, et de pollution. On pourrait alors consommer l'énergie sans s'inquiéter, parce que le soleil nous en donne au-delà de nos besoins et de nos capacités. De plus, cette disponibilité permet aux hommes de cesser les fausses guerres fratricides qui se construisent autour des énergies. On aura plus besoin d'allumer des foyers de tension dans le monde. Car, comme le disent les malthusianistes, la rareté des ressources engendre les guerres. En fait, cette rareté ou cette peur de la rareté des énergies naturelles a fait beaucoup de victimes de guerres. Phillipe Hugon affirme :

> Les relations entre guerres et ressources naturelles ont conduit à une écologie politique de la guerre analysant les guerres de ressources, environnementales, de pillage ou de sécession liées aux ressources naturelles. Un État détenteur de ressources en hydrocarbures a neuf fois plus de risques d'être le théâtre de conflits armés qu'un État non pourvu. Les ressources naturelles peuvent fournir les moyens de financer les rébellions motivées par d'autres intérêts que les ressources elles-mêmes. Elles peuvent, étant concentrées dans un territoire délimité, favoriser des tentatives sécessionnistes. Elles conduisent à des comportements rentiers interdisant ou retardant des institutions fortes. Les ressources naturelles du sous-sol peuvent, du fait de leur abondance, attiser des contrôles par la violence (coloniale, impérialiste, pillage). Les ressources naturelles du sol peuvent, du fait de leur rareté (eau, terre), aviver les tensions. Il n'y a pas toutefois de lien déterministe même si la malédiction des ressources naturelles est forte.[308]

Toutes ces situations de raréfaction ou de la peur de raréfaction des ressources naturelles peuvent être résorbées en développant une technologie d'exploitation optimale de l'énergie solaire. La disponibilité de cette énergie ne permettra plus de trouver des excuses à quiconque voudra mener une guerre de ressources. Mais, le défi qui demeure encore est celui de la bonne maîtrise de cette technologie à l'effet d'une exploitation optimale. A terme, il faudrait que les rayons qui arrivent sur la surface de la terre soient presque tous capturés pour qu'ils ne soient pas nocifs à la santé et qu'ils puissent constituer d'énormes réserves d'énergie pouvant faire fonctionner les voitures, les avions, voire des fusées qui demandent souvent d'énormes quantités de carburant à coût très onéreux avec des impacts négatifs sur l'environnement.

Tout compte fait, si on réussit ce défi, on aura résolu le problème du réchauffement de système thermodynamique planétaire ; on aura réussi, à l'avenant, à réduire la pollution qui influence également son réchauffement ; on aura enfin résolu le problème de la raréfaction des ressources naturelles. Ce que faisant, on aura fait baisser l'entropie au sens thermodynamique et

[308] Philippe Hugon, *Le rôle des ressources naturelles dans les conflits armés africains*, dans « Hérodote », 2009/3 (n° 134), pages 63-79.

au sens de la vie sociale où les guerres augmentent l'entropie de la société (les guerres peuvent être considérées comme une source de désordre). La vie sociale sera, à l'avenant, moins chaotique et moins crisique.

Après la piste d'une exploitation maximale de l'énergie solaire, nous pouvons également parler de l'exploitation des plasmas froids comme contribution scientifique de notre recherche.

8.2.2. Technologie au plasma: De la Biomédecine au plasma froid et des sources d'énergie au plasma chaud

Le plasma constitue le quatrième état de la matière. C'est d'ailleurs le plus abondant dans l'univers, bien qu'il soit rare sur la terre. Le plasma représente à peu près 99% de la matière ordinaire. Wikipédia rapporte que *« Les plasmas sont extrêmement répandus dans l'univers puisqu'ils représentent plus de 99 % de la matière ordinaire. Toutefois, ils passent presque inaperçus dans notre environnement proche, étant donné leurs conditions d'apparition sont très éloignées des conditions de température et de pression de l'atmosphère terrestre. »*[309]D'autres sources spécialisées en physique des plasmas sont plus précises en la matière, et font plutôt état de 99, 99% de plasma dans l'univers contre 0, 01% pour les autres états de la matière cumulés. Pour ces sources, le système solaire serait constitué à 99,85% de plasma. On peut lire dans le site internet d'ITER[310] ce qui suit :

> Le moins connu des quatre états de la matière est aussi, paradoxalement, le plus répandu : 99,99% de l'univers visible — les étoiles, le milieu intergalactique... se trouvent à l'état de plasma. Dans notre système solaire, qui compte pourtant quatre planètes bien solides (dont l'une, la nôtre, regorge d'eau liquide) et quatre géantes gazeuses, le pourcentage est à peine moindre : le Soleil, énorme sphère de plasma brûlant, concentre 99,85% de la masse totale du système.[311]

A cause du simple fait qu'il représente l'état le plus abondant, à savoir celui qui couvre presque tout l'univers, le plasma devrait susciter de l'intérêt. Mais force est de constater que sa faible représentation sur la terre fait qu'il ne soit pas souvent très évoqué lorsqu'on fait mention

[309] https://wikipedia.org

[310] ITER (en latin le « chemin ») est l'un des projets les plus ambitieux au monde dans le domaine de l'énergie. L'objectif principal d'ITER est de générer des « plasmas en combustion », et d'en comprendre le comportement. Des milliers d'ingénieurs et de scientifiques ont contribué à la conception d'ITER depuis que l'idée d'une collaboration internationale sur l'énergie de fusion a été lancée en 1985. Les Membres d'ITER (la Chine, l'Union européenne, l'Inde, le Japon, la Corée, la Russie et les États-Unis) se sont engagés dans une collaboration pour construire et exploiter l'installation expérimentale ITER.

[311]IER,*Plasmas : la matière dans un drôle d'état* in https://www.iter.org/fr/mag/13

des états de la matière. La question qui nous vient à l'esprit est de savoir qu'est-ce qu'un plasma ? Quel est l'intérêt que nous pouvons en tirer ? Nous répondons simplement en disant que le plasma est une soupe d'électrons où baignent les noyaux d'atomes. Il s'obtient par ionisation d'un gaz. C'est pourquoi il est appelé gaz ionisé. Il est produit lorsque l'on soumet un gaz à des températures souvent supérieures à 11 000K. L'Encyclopédie *Universali*s en ligne nous apprend que *: « l'état plasma peut être considéré comme le quatrième état de la matière, obtenu, par exemple en portant un gaz à très haute température (10^4 K ouplus). L'énergie d'agitation thermique des molécules et des atomes constituant le gaz est alors suffisante pour qu'un électron puisse être arraché à l'une d'elle. »*[312]A ces températures extrêmes qui permettent l'arrachement des électrons de la couche externe de leurs atomes. Il se forme alors une soupe d'électrons dans laquelle baignent aussi des noyaux d'atomes et des molécules neutres. Dans le cœur des étoiles, ces températures atteignent souvent des millions de degrés voire plus.

On peut avoir des plasmas chauds ou froids. Les plasmas chauds sont obtenus quand la source de bombardement est interne, alors que les plasmas froids sont obtenus lorsque cette source est externe. On peut lire dans la partie que Wikipédia consacre au plasma ce qui suit : *« Un plasma peut également se former à basse température si la source d'ionisation lui est extérieure. C'est le cas de l'ionosphère, cette couche élevée de l'atmosphère terrestre qui, bien que froide, subit en permanence un intense bombardement ionisant de particules venant du soleil. »*[313]Par rapport à cette source de bombardement et à la température de chauffage, les ions froids sont des plasmas dont seulement une partie infime de gaz est chauffée. Ils restent donc globalement froids à l'échelle de notre observation alors que, c'est tout le contraire des plasmas chauds, qui sont complètement ionisés. Martin Koppe dit à propos :

> Les plasmas froids s'obtiennent en appliquant une décharge électrique à un gaz isolant dont seule une faible proportion va s'ioniser, contrairement à ce qui se passe, par exemple, pour les plasmas stellaires. Certains électrons vont ainsi être chauffés à plusieurs dizaines de milliers de degrés mais, comme ces particules ne représentent qu'une infime partie du gaz, ce plasma demeure globalement « froid » à notre échelle par comparaison aux plasmas qui atteignent des millions de degrés.[314]

Tous les deux, plasmas chauds et plasmas froids, sont donc des objets d'étude qui peuvent contribuer au progrès de la science. Des études sont déjà réalisées sur les plasmas pour voir

[312] https:// www.universalis.fr
[313] https://fr.wikipedia.org/wiki/Physique_des_plasmas
[314] MartinKoppe, Les plasmas froids réchauffent l'innovation, mis en ligne le 04.03.2016 inhttps://lejournal.cnrs.fr/articles/les-plasmas-froids-rechauffent-linnovation

comment mettre à contribution cet état de la matière à toutes fins utiles. Pour les plasmas froids, la technologie est un peu plus facile que pour les plasmas chauds.

En effet, comme nous l'avons dit plus haut (ch 4.1.3), les plasmas froids sont des plasmas fortement corrélés du fait que le gaz ne soit pas globalement chaud. Des industries développant le plasma froid sont déjà existantes en grande quantité dans le monde. Dans ces technologies, il est question de créer des plasmas à température ambiante qui soient sains à l'endroit du corps humain voire à l'endroit des autres organismes vivants. Ces plasmas sont donc inoffensifs et peuvent interagir avec le vivant. Ils sont, dès lors, sollicités en la technologie biomédicale où ils pourront permettre de soigner les cancers et de soigner les blessures, d'après certaines études récentes. Claire Douat, Thierry Dufour et João Santos Sousa qui mènent une étude là-dessus affirment :

> Les plasmas froids peuvent endommager l'ADN et diverses biomolécules (protéines, lipides), mais aussi inactiver des agents pathogènes y compris ultrarésistants (bactéries, virus, champignons). Ils permettent ainsi de désinfecter et décontaminer des surfaces biologiques (ex. tissus ou aliments), et même de stériliser des surfaces inorganiques (ex. implants ou outils médicaux), de favoriser la coagulation sanguine et la cicatrisation des plaies, d'initier l'apoptose (mort cellulaire programmée) et de ralentir la croissance tumorale.[315]

Ainsi, pour Claire Douat, Thierry Dufour et João Santos Sousa, non seulement ces plasmas froids sont inoffensifs, ils peuvent être thérapeutiques en détruisant les agents pathogènes, en ralentissant les tumeurs, et en interagissant avec le corps humain sans gravité. Toujours dans le domaine médical, la *Médecine au Plasma* peut efficacement remplacer l'opération chirurgicale classique où on peut atteindre le mal et l'extirper sans sectionner la peau encore moins ouvrir le corps. Cela diminue les traumatismes de l'opération, les cicatrices post-opératoires etc. Dans un document spécialisé dans le Traitement de l'HBP, on peut lire : *« Le PLASMA est utilisé tous les jours en médecine moderne, par exemple, pour le traitement des plaies chroniques et des affections cutanées, en gastroentérologie et en chirurgie. »*[316] *La médecine au plasma* est donc une médecine innovante et efficace qui utilise une biotechnologie qui cause moins de dommages à la peau, ne laissant pas de cicatrices.

Si les plasmas froids sont plus ou moins domestiqués par l'homme, les plasmas chauds quant à eux, restent moins contrôlables, à cause du simple fait que les gaz sont portés à très haute

[315] Claire Douat, Thierry Dufour, João Santos Sousa, Les plasmas froids et le Vivant, de nouvelles Avancées, Reflets de la Physique, 2023, 75, pp.24-30.
[316] https://www.bph-plasma.eu/fr/bph_plasma/plasma_therapy/index.html

température, ce qui rend difficiles les expériences de laboratoire. De ce fait, la connaissance sur les plasmas chauds se focalise encore davantage au niveau théorique et au niveau de la recherche fondamentale. La mise en pratique n'est pas encore très évidente, comme c'est le cas avec les plasmas froids.

De plus, les plasmas chauds demeurent dangereux, car ils peuvent endommager le corps humain. On trouve donc peu de laboratoires proposant de faire des expériences sur les plasmas chauds. L'expérience des plasmas chauds essaie de reproduire la combustion dans les étoiles qui consiste en la fusion des atomes d'hélium et d'hydrogène. Ainsi, ces expériences au plasma chaud constituent des expériences de fusion. Dans la section que Wikipédia consacre au plasma, on peut lire :

> Historiquement, les premières études sur les plasmas chauds se basaient sur les observations astrophysiques, notamment celles relatives au soleil. Pour expliquer l'origine de l'énergie des étoiles et de celle du soleil en particulier, le physicien Allemand Hans Bethe imagina, en 1939, qu'à l'intérieur du soleil, la température dépasse 10^7 K et il s'y déroule un ensemble complexe de réactions de fusion de noyaux légers.[317]

La fusion est donc le processus de formation des plasmas chauds dans les étoiles. Par le même processus, on peut reproduire ce qui se passe dans les étoiles et surtout produire une source d'énergie plus puissante que toutes les sources d'énergie actuellement connues et disponibles sur la terre. C'est ce que nous pouvons lire dans le programme ITER décrivant théoriquement le processus de formation des plasmas chauds dans le futur laboratoire :

> Le potentiel énergétique des réactions de fusion est supérieur à toutes les autres sources d'énergie actuellement exploitée sur Terre. La fusion d'atomes d'une manière contrôlée libère une énergie près de quatre millions de fois supérieure à celle que génèrent des réactions chimiques telles que la combustion du charbon, du pétrole ou du gaz naturel et quatre fois supérieure à celle de la fission nucléaire.[318]

La mise en pratique des plasmas chauds fera donc beaucoup de bien en matière de production d'énergie. Une énergie supérieure de façon exponentielle à celle fournie par les combustibles fossiles, les gaz naturels, réactions chimiques etc. La maîtrise des plasmas chauds pourra impulser une révolution énergétique inimaginable.

De plus, contrairement aux énergies actuellement disponibles dont la plupart sont polluantes, les plasmas ne présentent pas de risque de pollution de l'environnement, car ils

[317] https://fr.wikipedia.org/wiki/Physique_des_plasmas
[318] ITER, Réaliser la fusion en laboratoire in https://www.iter.org/fr/sci/makingitwork

n'émettent pas de CO2. En conséquence, ils n'inquiètent donc pas sur la gestion des émissions de déchets polluants et l'avenir de ces déchets. Dans la publication d'un autre document, le programme ITER ajoute : *« En France, […] 35 pays* sont engagés dans la construction du plus grand tokamak jamais conçu, une machine qui doit démontrer que la fusion — l'énergie du Soleil et des étoiles — peut être utilisée comme source d'énergie à grande échelle, non émettrice de CO2, pour produire de l'électricité. »*[319] Cependant, les plasmas chauds ne sont pas encore vraiment à la portée de l'homme. Non seulement ils ne sont pas encore domestiqués à cause des températures extrêmes dans lesquels les gaz sont soumis, ce qui pourrait constituer un danger pour l'homme, en plus ils exigeraient un matériel de pointe pour résister à la chaleur qu'ils génèrent. Les laboratoires seraient alors très onéreux et très difficiles à construire à cause de la sophistication technologique que cela exige.

Tout compte fait, la recherche pourrait également se tourner vers cette technologie à base de plasmas chauds, qui consiste à *créer un soleil artificiel* qui fournirait à l'homme autant d'énergie qu'il souhaiterait, avec surtout le grand avantage d'être une énergie non polluante. Cela dit, nous nous penchons vers un autre aspect que nous pouvons capitaliser dans le cadre des avancées technologiques à partir de cette réflexion : les systèmes fonctionnant avec la supraconductivité du courant électrique.

8.2.3. Des technologies à base de la supraconductivité: des systèmes de transports lévitants aux coûts d'électricité « bon marché »

La supraconductivité est un phénomène physique étrange qui est en lien avec le refroidissement du métal à des températures très proches du zéro absolu, donc -273,15° Celsius ou plus simplement 0K. En étudiant ce phénomène, nous établissons directement un lien avec la décroissance de l'entropie dont nous avons parlé tout au long de notre travail. Avant d'entrer dans le vif de la contribution, il est important que nous définissions ce qu'est la supraconductivité.

Pour le survol historique, la supraconductivité a été découverte en 1911 par le physicien néerlandais Heike Kammerlingh Onne. Il se rend compte qu'en refroidissant certains métaux à des températures en dessous de la température critique, le métal devient un supraconducteur, à

[319] ITER, C'est quoi ? in https://www.iter.org/fr/proj/inafewlines

savoir un conducteur parfait de courant continu, ne présentant aucune résistance de la part du métal conducteur. Le courant électrique pouvait circuler dans les lignes du conducteur éternellement sans qu'il ne présente aucune perte. Mais jusque-là, le phénomène ne pouvait pas encore être clairement expliqué. Le phénomène de supraconductivité sera ensuite expliqué presque un demi-siècle plus tard en 1957 par trois physiciens John Bardeen, Léon Cooper et Robert Schrieffer qui gagneront un prix Nobel grâce à leur découverte. Leur théorie se nommera théorie BCS, correspondant aux initiales de leurs noms. On peut lire dans le site futura-sciences, dans un dossier consacré à la supraconductivité ce qui suit : *« Mais la physique fondamentale de la supraconductivité ne fut maîtrisée qu'à partir de 1957, lorsque les physiciens américains John Bardeen, Leon Cooper et John Schrieffer élaborèrent une théorie qui leur valut le prix Nobel de physique en 1972 : la théorie BCS. Cette théorie décrit la supraconductivité comme un phénomène quantique. »*[320]

En effet, de quoi s'agit-il réellement ? Il s'agit en clair du fait que chaque métal présente une résistance à la circulation du courant continu, comme de l'eau que l'on voudrait faire passer par un petit tube. Il en ressort des pertes quand on essaie de le faire. C'est la question de la résistance du métal à la conduction du courant électrique. Pour comprendre la supraconductivité, il faut se rendre compte du comportement des électrons qui, dans leurs mouvements incessants (interactionsmultiples des électrons dans un système sous l'effet des températures élevées) empêchent le courant électrique de circuler facilement. Mais, à très basse température, ils forment un bloc collectif, une seule configuration. Les électrons se regroupent donc par deux, ce que l'on appelle la paire de Cooper et interagissent avec les atomes avec qui ils forment un seul bloc collectif voire une seule configuration. Le courant peut alors circuler sans rencontrer de résistance. C'est ce que nous lisons dans une page du CEA[321] consacrée à la supraconductivité :

> La supraconductivité est un phénomène quantique collectif. C'est une des manifestations possibles, et perceptible à notre échelle, du comportement quantique de la matière. Dans les matériaux supraconducteurs classiques, les électrons se regroupent par paires (dites paires de Cooper), en interagissant avec les atomes présents autour d'eux. Ils forment alors une vague collective. Cette vague électronique se propage comme une onde, sans subir de collision avec les défauts présents dans la matière, ce qui permet de conduire du courant électrique sans perte

[320] *Découverte et historique de la supraconductivité* in https://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/physique-supraconductivite-103/page/2/

[321] Commissariat à Energie Atomique

d'énergie. Ce phénomène ne peut se produire qu'à basse température lorsque les atomes du matériau ne vibrent pas trop.[322]

Cela nous rappelle la nouvelle grille d'intelligibilité de l'entropie dans laquelle nous sommes parvenu. Nous disions alors qu'il ne s'agit pas de comprendre la configuration unique de la formule du troisième principe de thermodynamique de Max Planck, *S= logW. Kb+S0 (0K),* comme un univers dont les configurations nombreuses se ramèneraient à un seul point unique par l'effet de la gravité, mais plutôt que toutes configurations, par refroidissement, formeraient une seule configuration pour que *W* (le nombre de configurations totales) soit égal à 1. Ce qui permet d'avoir un résultat final de l'ordre de zéro, puisque le logarithme de 1 est égal à zéro. De ce fait, par analogie, nous avons déduit que l'univers tout entier, malgré le grand nombre exponentiel de configurations qu'il détient, tend vers une seule configuration. Autant le dire, c'est la même chose qui se passe ici. Proche du zéro absolu, les atomes et les électrons regroupés en pairs ne forment qu'une seule configuration. Les mouvements des électrons et les vibrations des atomes sont en arrêt. Toute résistance est détruite. La loi d'Ohm qui rend compte de la conduction du courant dans un circuit énonce que **U = R × I,** tel que :

U, la tension aux bornes de la résistance ;

I, l'intensité du courant qui circule à travers la résistance ;

R, la valeur de la résistance.

On peut encore écrire $\mathbf{I} = \frac{\boldsymbol{U}}{\boldsymbol{R}}$**.**Dans la deuxième façon d'écrire cette loi, lorsque nous recherchons plutôt l'intensité, il ressort que celle-ci est proportionnelle à la tension du courant dans un circuit est fonction de la résistance. Plus la résistance est grande, plus l'intensité diminue. Pour une résistance nulle, l'intensité sera égale à la tension. Il n'y aura donc plus aucune perte possible. Voilà comment expliquer la supraconductivité. Cela engendre deux effets physiques spontanés, à savoir :

- La supraconductivité
- La lévitation magnétique

[322] CEA, *La supraconductivité et ses applications* in https://www.cea.fr/comprendre/Pages/matiere-univers/essentiel-sur-supraconductivite-et-applications.aspx

La supraconducticité ou supraconduction, c'est le phénomène que nous venons de décrire, à savoir : en dessous de la température critique, la plupart des métaux du tableau périodique deviennent des conducteurs parfaits du courant électrique. Un conducteur électrique parfait est un conducteur qui transporte le courant sans aucune perte grâce à la non-résistance des électrons et des atomes du métal en question. La circulation du courant électrique peut être, dès lors, éternelle, si la température reste constante d'après la loi d'Ohm que nous venons de décrire plus haut.

La lévitation magnétique est l'autre effet qui apparaît. Les champs magnétiques sont annulés. C'est l'effet Meissner. C'est un effet qui se vit par le flottage de l'aimant au-dessus du suppraconducteur. La raison est simple : c'est que le supraconducteur crée un champ magnétique opposé à celui de l'aimant. En temps normal, un aimant crée autour de lui un champ magnétique qui traverse tout matériau non magnétique qui se trouverait dans son rayon. Supposons maintenant un morceau de céramique non magnétique et un aimant. Ce petit morceau de céramique devient supraconducteur à très basse température, et expulse le champ magnétique de l'aimant. Cela engendre alors une force sur l'aimant qui le fait léviter au-dessus : c'est l'effet Meissner. Il s'explique comme il suit : dans un supraconducteur, comme nous l'avons montré plus haut, les électrons se réunissent en une onde quantique collective pour former une configuration unique, c'est le condensat. Le champ magnétique de l'aimant aura tendance à tordre cette onde, et à créer un déphasage qui est défavorable à cette nouvelle situation de l'état supraconducteur. Mais cette onde ne peut pas céder, car l'onde supraconductrice est très rigide. Elle ne peut donc pas en conséquence se tordre au risque d'être brisé. Le supraconducteur cherche donc à se protéger du magnétisme, en l'expulsant. C'est ce qui fait léviter l'aimant donnant lieu à l'effet Meissner. Quand on essaie de déplacer le supraconducteur, l'aimant en lévitation magnétique se déplace également.

La supraconductivité est un effet de la mise en application du troisième principe. Elle permet de faire des économies énormes en termes de consommation d'électricité. Pour mettre en pratique un système de communication exploitant la physique de la supraconductivité du courant électrique, il faudrait combiner les deux phénomènes en même temps : la supraconductivité et la lévitation magnétique. Ainsi, on peut déplacer un train, une voiture grâce à ce phénomène aujourd'hui. On pourra peut-être déplacer des avions, par le même processus. Somme toute, les avantages générés par cette technologie sont énormes :

- Economie en énergie. On gagne par rapport aux dépenses en matière de carburant qui s'élèvent évidemment à des coûts très énormes pour ces gros engins. Si on peut utiliser un une voiture, un train, avion qui ne consomme pas de carburant, les entreprises vont énormément gagner et l'on ne sera plus préoccupé par l'anxiété du manque de carburant ou de son épuisement.
- En écologie, la supraconductivité est une technologie non polluante. Les systèmes utilisant la supraconductivité laissent sain et sauf l'environnement. En effet, ils représentent une technologie qui ne rejette aucune fumée.
- Le confort sonore. Le transport ne présente pas de nuisance sonore due au fonctionnement des réacteurs. Le courant continu introduit dans le système supraconducteur et la lévitation magnétique compensent les réacteurs.

En dehors de son exploitation dans le domaine du transport, cette technologie permet également de faire des économies dans les installations électriques. Le principe est simple, plus on refroidit les conducteurs à des températures très basses, plus ils portent plus d'intensité. Si on conçoit des systèmes électriques avec des matériaux supraconducteurs testés et éprouvés, et que l'on garde ces systèmes froids à des températures assez basses, nécessairement on fera des économies d'électricité car les conducteurs seront moins résistants à la conduction du courant électrique et les ménages pourront avoir un courant de grande intensité qui ne leur coûtera pas grand-chose en termes de paiement.

Pour le moment, cette technologie est très rare dans le monde à cause des facteurs économiques (coût de fabrication très onéreux), la masse des matériaux en sustentation qui doit être contrôlée, limitant automatiquement le nombre de personnes à bord ainsi que la marchandise à transporter. Toutes ces difficultés peuvent être bravées à coup d'efforts et de travail acharné, car rien n'est donné ; tout est conquis.

CHAPITRE 9 : COMPRENDRE LA VIE À PARTIR DE LA PHYSIQUE

Après l'évaluation de la théorie physique sur les entropies locales et l'entropie générale, et la rupture épistémologique que cela a engendré à l'issue des débats très houleux en thermodynamique concernant le principe d'entropie et sa mise en valeur tout au long de ce travail, il importe de récapituler les débats et de les capitaliser pour mettre ce principe d'entropie en rapport avec certains problèmes pérennes de la philosophie comme la question de la nature de la vie, son principe, son fonctionnement, qui jusqu'ici constituent des zones d'ombre ou simplement un mystère. Il s'agit de revenir sur la sempiternelle question qui a toujours tracassé les penseurs de tous bords au fil des époques, sans jamais donner une réponse complète et définitive, à savoir : *qu'est-ce que la vie ?* Cette question soulève habituellement deux tendances majeures généralement en conflit, à savoir le mécanisme et le vitalisme, en arguant chacune des principes à l'opposé de l'autre. L'occasion nous est donnée, de prendre part à cette réflexion, en partant de la thermodynamique qui range tout ce qui existe dans des types de systèmes thermodynamiques spécifiques y compris le vivant. Ainsi la thermodynamique nous permet-elle de mieux comprendre le vivant et le non vivant, tout en introduisant une troisième catégorie dite émergente : le *vyvant*. Le principe entropique évoqué par la physique et le principe anthropique soutenu par la philosophie permettront également de mieux nous situer. La vie peut-elle se comprendre à partir de l'entropie ? Ou doit-on la comprendre au-delà de l'entropie, en s'appuyant sur l'anthropie ?

9.1. Entre mécanisme et vitalisme

9.1.1. De la physique à la biophysiologique : insuffisance explicative de la vie par l'entropique négative

Le mécanisme est un courant philosophique qui remonte à la période antique en philosophie. On associe souvent ses origines aux premiers philosophes atomistes présocratiques dont la grille d'intelligibilité de la matière, la vie incluse, était basée sur les atomes. De ce qui

précède, le mécanisme peut être perçu comme un matérialisme qui essaie d'expliquer la vie à partir des phénomènes scientifiques. De ce point de vue, le mécanisme s'appuie sur les lois et principes scientifiques pour rendre compte de la vie. En fait de mécanisme, il s'agit du mécanisme scientifique qui consiste à comprendre les mécanismes de la vie ou du vivant à partir de la présente étude. Régis Jolivet affirme que :

> S'il ne s'agit pas de théorie philosophique, mais seulement d'une méthode pour étudier les phénomènes biologiques, en les ramenant à leurs conditions physico-chimiques, susceptibles d'être traitées comme des mécanismes, et de se prêter à la mesure et au calcul, le philosophe n'a pas d'objection à formuler. C'est aux savants eux-mêmes de voir dans quelle mesure les méthodes usitées dans la physique et la chimie sont valables en biologie.[323]

Ainsi, la physique, à travers la thermodynamique, essaie-t-elle aussi de comprendre la vie à partir de simples lois et principes scientifiques. Si tout dans l'univers peut se comprendre comme un système thermodynamique, c'est-à-dire une portion de l'univers délimitée par des frontières réelles ou imaginaires, l'homme lui aussi, comme toutes les autres entités physiques, est un système thermodynamique. Sa thermodynamique est, certes, une thermodynamique du vivant nommée biothermodynamique. Mais, il n'en demeure pas moins que ce soit une thermodynamique quand même. Arthur Shavit et Arthur Chaim Gutfinder affirment: *« for a system to be defined, one must specify its exact boundaries and the contents within these boundaries. »*[324]Cela dit, un système a juste besoin qu'il soit limité dans le temps et dans l'espace pour qu'il existe et qu'il soit considéré comme tel. Ils ajoutent, par ailleurs, que:*« The boundary of the system may be real or imaginary, and it may be stationary or changing with time ; it must, however, be well defined at all times. »*[325]Ainsi, chaque chose à laquelle on peut penser est un système à une certaine échelle. Cela dit, le vivant a souvent été considéré comme un système thermodynamique ouvert qui développe une entropie négative.

En effet, nous avons dit qu'il existe trois principales catégories de systèmes thermodynamiques : les systèmes isolés, fermés et ouverts. Nous savons que les systèmes isolés ne sauraient développer la vie du fait que leur entropie est très souvent croissante. L'entropie croissante est synonyme de mort thermique, situation d'équilibre des variables où il n'existe plus

[323]Régis Jolivet, *Traité de philosophie, introduction générale logique cosmologie*, 4e édition, Emmanuel Vitte éditeur, 1939, p. 436.
[324]Arthur Shavit and Chaim Gutfinder, *Thermodynamics. From concepts to applications*, CRC Press Taylor and Francis group, 2008,*Op.Cit* p.6
[324]*Idem*
[325]*Idem*

d'activité dans le système. Nous soulignons également que nous avons précisé qu'un vrai système thermodynamique isolé n'existe pas dans la réalité, mais n'est qu'une simple approximation théorique. Par ailleurs, nous n'avons pas établi une grande différence entre systèmes ouverts et systèmes fermés à cause du fait que le système fermé est une sorte de système ouvert dont la nature des échanges s'arrête aux énergies, au travail, à la chaleur, sans toucher aux échanges de matière. Dans le cadre de notre réflexion, nous avons englobé indifféremment systèmes ouverts et fermés dans le même traitement à cause du fait qu'ils communiquent tous avec leur environnement à quelques différences près. Il est donc question maintenant de regarder du côté des systèmes ouverts de manière générale, à l'effet de distinguer parmi eux ceux qui développent une entropie croissante de ceux qui développent une entropie décroissante. On observe que la vie se développe uniquement dans les systèmes ouverts à entropie décroissante. La particularité des systèmes thermodynamiques à entropie décroissante est que, ceux-ci peuvent évoluer loin de l'équilibre thermodynamique. Or, nous savons que l'équilibre thermodynamique, c'est la mort thermique qui est une façon physique de décrire la fin de l'être. On dit alors, par principe, que la vie a horreur de l'entropie. Elle essaie de s'en éloigner au maximum.

C'est pourquoi, pour éviter la mort thermique et continuer d'entretenir une activité thermique normale, le système ouvert évolue loin de l'équilibre thermodynamique et laisse cours aux phénomènes dissipatifs grâce auxquels la matière s'auto-assemble, puis s'auto-organise. Dans l'auto-organisation apparaissent des structures complexes témoignant du fait que les particules ne sont plus dispersées dans tout le système, mais elles sont de plus en plus regroupées en mesure que la température du système diminue. Ce système va donc évoluer du chaos vers l'ordre, chose qui caractérise la thermodynamique non linéaire des processus dissipatifs. L'entropie de ce système va nécessairement diminuer au cours du temps. Au lieu d'une entropie croissante, on observera plutôt une production d'entropie négative qui est perceptible à l'apparition des structures complexes organisées. Le système passe donc du chaos vers l'ordre grâce à l'apport du milieu extérieur. Ceci se passe grâce aux fluctuations qui font décroître l'entropie. Ces phénomènes se produisent lorsque la symétrie spatio-temporelle du système est brisée et que le système présente des configurations différentes dans ses différentes parties, contrairement à la situation d'équilibre où toutes les parties du système sont presque identiques en termes de distributions de variables intensives. Un pareil système est actif à cause du fait qu'il

établit des échanges multiformes avec son milieu. Les systèmes où la vie se développe se comportent de cette façon. Ils développent une thermodynamique des processus irréversibles de non-équilibre. Wikipédia qui explique le phénomène de dissipation grâce auquel s'effectuent les échanges, décrit comment celles-ci se déroulent dans un système ouvert :

> Un système dissipatif (ou structure dissipative) est un système qui évolue dans un environnement avec lequel il échange de l'énergie ou de la matière. C'est donc un système ouvert, loin d'un équilibre thermodynamique. Un système dissipatif est caractérisé par le bilan de ses échanges (échange d'énergie, création d'entropie), et l'apparition spontanée d'une brisure de symétrie spatiale (anisotropie) qui peut quelquefois laisser apparaître une structure complexe chaotique. Le nouvel état du système est stabilisé grâce à sa « consommation » d'énergie issue de l'environnement. L'expression « structures dissipatives » fut créée par Ilya Prigogine.[326]

Le système ouvert est donc un système particulier en physique ; il est caractérisé par la production d'entropie négative qui permet au système d'être actif grâce aux nombreux échanges effectués. En physique, un système ouvert qui n'effectue pas ces échanges, est un système en état de mort thermique. En revanche, un système qui effectue des échanges avec son environnement, tout en évitant la mort thermique par son évolution loin de l'équilibre grâce aux phénomènes dissipatifs, est un système qui développe la vie thermique. Mais, est ce que cette vie thermique et cette mort thermique peuvent être assimilées à la vie et à la mort biologique ? Cela revient à se demander si le système ouvert en physique peut être assimilé au système vivant en biologie ? Suffit-il à un système thermodynamique d'effectuer ce que nous avons dit d'un système ouvert pour être un système vivant du point de vue biophysiologique ? En d'autres termes, peut-on appeler système vivant un système thermodynamique ouvert sur son environnement, effectuant des échanges et se protégeant contre la mort thermique par une évolution vers le non-équilibre et développant des phénomènes dissipatifs qui font apparaitre des petites organisations, produisant une entropie négative ? La vie se résume-t-elle à une simple production d'entropie négative dans un système ouvert ? Auquel cas, nous pourrions simplement résumer la vie à ces échanges entre un système actif et le milieu extérieur qui lui apporte les éléments suffisants pour diminuer son entropie. Nous pourrions alors dire que la physique soit parvenue à rendre compte de la vie, à travers une catégorie fondamentale, à savoir : l'entropie. La thermodynamique des processus de non-équilibre serait alors l'énigme au mystère tant recherché. Mais, à l'évidence, cela est problématique du fait que de pareils systèmes foisonnent un peu de partout, mais sans avoir proprement de vie biologique. Cependant, on leur reconnaît une vie thermique. La vie biologie

[326] https://fr.wikipedia.org/wiki/Système_dissipatif

ne saurait donc correspondre avec la vie thermique. Cette dernière est la matière constituante de tous les systèmes vivants, c'est-à-dire les organismes qui luttent pour se maintenir. En plus de la simple vie thermique, la vie biologique consiste, elle, à éviter le maximum entropique ou simplement la mort thermique et surtout à **lutter** pour la ralentir dans un système vivant. Joël de Rosnay affirme : *« pour lutter contre les effets de l'entropie - énergie "usée"-, et éviter ce nivellement énergétique qui est la mort, la cellule a donc un besoin d'énergie "fraîche". »*[327]La vie biologie n'est donc pas seulement une production d'entropie négative, mais **une lutte pour le maintien**. De ce qui précède, nous ne saurions conclure que le simple fait qu'un système soit ouvert et qu'il développe l'entropie négative suffisent pas à expliquer la vie biologique. La physique ne suffit donc pas à elle seule pour expliquer la vie. La physique devient donc une théorie incomplète au sens de Kurt Gödel, c'est-à-dire une théorie qui ne peut pas se suffire à elle-même pour rendre compte d'un phénomène à partir de sa base théorique. Elle doit sortir de celle-ci pour aller chercher ailleurs. Parlant de l'incomplétude théorique de la théorie quantique, nous disions dans un précédent travail que :

> Le fait que la théorie quantique ne puisse pas rendre compte d'elle-même serait, selon l'approche de Gödel, une théorie incomplète car elle va chercher des moyens et des catégories mathématiques. Mais, malheureusement, celles-ci ne peuvent s'exprimer qu'avec le langage de son domaine. Toutes choses qui ne s'adaptent pas la réalité physique qui, elle, n'est pas mathématique mais empirique.

La physique ne peut donc pas, par elle seule, rendre compte de la vie. Elle nous décrit les types de systèmes : isolés, fermés et ouverts, en indiquant ceux qui sont les plus susceptibles d'abriter la vie. C'est selon, elle, ceux dont l'entropie serait négative. Mais comment ? Et quelles conditions ? Ces conditions réunies suffiraient-elles pour déclencher les processus vitaux et les métabolismes y afférents. Comment l'ADN qui constitue la signature de tout être vivant s'est-il formé ? Est-il simplement un regroupement de matière, comme tout auto-assemblage qui pourrait avoir lieu dans un système ouvert à entropie négative caractérisant la thermodynamique non linéaire des processus irréversibles ? Toutes ces questions demeurent. Et la physique ne peut rien dire. Elle constate juste que certains systèmes ouverts sont vivants, et d'autres non. Elle peut, en outre, rendre compte de la vie physique et de la mort physique. Cependant, la vie et la mort biologique lui sont encore énigmatiques. Cela signifie qu'il faille aller quêter et enquêter au-delà de l'entropie.

[327] Joël de Rosnay, *Les origines de la vie, de l'atome à la cellule*, Seuil, Paris, 1966, *Op.Cit*. pp. 46.

9.1.2. D'un simple mécanisme physique à mécanisme intelligent : la violation de l'inégalité de Clausius par la biothermodynamique

Nous avons montré que la vie biologique ne saurait s'expliquer à partir d'une thermodynamique du vivant basée essentiellement sur l'entropie, car comme nous le verrons par la suite, un système vivant est davantage plus complexe. Nous ne saurions nous contenter de lire la vie comme une simple production d'entropie négative. Cette dernière est, certes, l'objectif recherché par tout système vivant, à savoir la lutte pour une production d'entropie négative.Mais pour y arriver, il faut compter avec les processus vitaux qui continuent d'intriguer tout observateur qui est habitué aux comportements des systèmes physiques ordinaires. Si l'entropie est la chose à éviter pour tout système thermodynamique vivant, et l'entropie négative la fin recherchée, il s'agit alors de reconstituer ce qui se trouve dans l'entre-deux de ces deux états.

En effet, nous avons dit que le système vivant est un système ouvert sur son environnement, et développant une entropie négative, avec une particularité qui le distingue de tous les autres systèmes ouverts à entropie négative. Cette particularité provient du fait que les systèmes développant la vie sont des systèmes intercalés entre l'entropie et la production d'entropie négative. Cet entre-deux est assuré par les mécanismes de fonctionnement vital. C'est à ce niveau que la physique va emprunter à la biologie. Car, la physique à elle seule ne peut plus rendre compte des phénomènes thermodynamiques appliqués à l'être vivant. Il faudrait alors faire appel à la bio-thermodynamique et par-delà, détecter chez le vivant ce qui est spécifique ou propre au vivant. Nous faisons allusion à ce qui fait que, d'une part, l'entropie ne soit pas maximale et, d'autre part, ce qui fait que l'entropie ne reste pas minimale, comme dans les systèmes inanimés. Quelle est cette chose qui fait que l'entropie fluctue toujours d'un seuil élevé vers un seuil moins élevé chez le vivant ? Cela revient à déterminer ce qui fait que le vivant soit un système *suis generis* par rapport aux autres systèmes existants. La première chose à remarquer c'est que l'évolution de l'entropie dans un système vivant n'est pas spontanée. Elle est plutôt assistée. En physique, on distingue d'une part les évolutions spontanées et les évolutions non spontanées. Les évolutions spontanées sont des évolutions qui se passent sans l'intervention d'un agent extérieur. Le fait que la chaleur évolue toujours du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid est une évolution spontanée. Par contre, le fait que la chaleur évolue dans le sens

contraire est une évolution non spontanée, cela ne peut être que provoqué. Nous pouvons en déduire que le fait que l'entropie augmente soit une chose spontanée. C'est ce qu'on a appelé *irréversibilité de Clausius* souvent notée, **ds =** $\int\frac{dQ}{T}$**>0.** Elle caractérise les transformations irréversibles des systèmes réels.

> Je définis [la vie] simplement : l'ensemble des phénomènes (qualifiés communément de physiologiques), nés, par émergence, de processus physico-chimiques d'un genre particulier : ceux propres à des molécules nucléo-protéiniques optiquement dissymétriques, et composées entre elles en systèmes organisés à une plus haute échelle. Ces ensembles organisés ou êtres vivants (auxquels on peut annexer les êtres sous-vivants ou Protobes) - sortes de méta-molécules - échappent à l'inégalité de Clausius **ds =** $\int\frac{dQ}{T}$**>0**[328]

En principe, le deuxième principe en relation avec la croissance exclusive de l'entropie tient dans toutes transformations irréversibles sans l'intervention d'un agent extérieur au système. Et dans le cas où cette intervention existe, l'entropie peut évoluer dans les deux sens selon ce que l'environnement apporte au système. Si l'apport de l'environnement est moindre que celui du système, la courbe d'évolution sera positive ; soit $+Q_p$ la chaleur dégagée sera positive et la transformation sera exothermique, et dans le cas contraire elle est négative et la transformation sera endothermique. Mais, dans un système vivant, cette évolution suit presque toujours le sens négatif. La question que l'on doit se poser est de savoir pourquoi l'entropie produite dans le cadre des systèmes vivants est toujours négative ?

C'est un contraste, car la température du corps est supérieure à la température de l'environnement. Presque 37° Celsius contre 15° Celsius. La production d'entropie d'un tel système devrait toujours être positive. En effet, la température du corps devrait évoluer jusqu'à une égale distribution de température avec le milieu extérieur qui se comporte comme un thermostat. Le système vivant devrait, en fait, dégager de la chaleur pour se retrouver à égale température du milieu extérieur. Dans le cas d'un simple système thermodynamique, l'enthalpie devrait suivre le sens de l'entropie, comme nous l'a montré au plus haut (cf section 3.1.2). Le système vivant chercherait à se mettre à égale température du milieu extérieur. C'est ce que nous pouvons visualiser à la figure ci-dessous.

[328]Georges Matisse, *A la source des phénomènes vitaux. Vers une bio-thermodynamique*, Paris Hermann & C[ie] éditeurs, 1954, *Op.cit,* p.4.

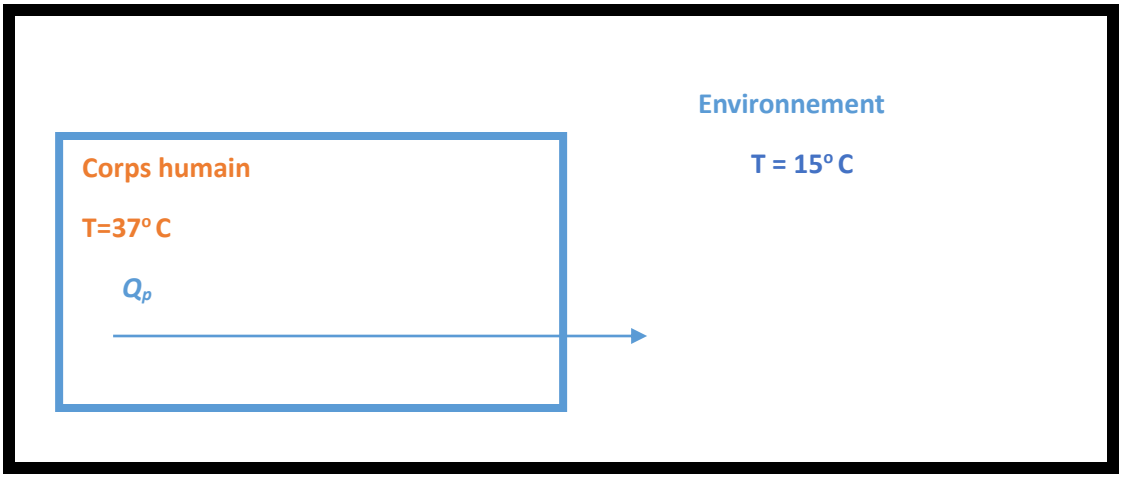


Figure 22 : Illustration de la situation qui devrait normalement avoir lieu dans une évolution thermodynamique spontanée entre le corps humain et son environnement.

L'entropie devrait donc être positive, car le système dégagera une chaleur correspondant à ce qui lui faut pour équilibrer sa température avec l'environnement. On obtiendrait, en principe, une situation où le corps humain passe à une température de 15° Celsius comme dans un couplage d'ensembles grand-canoniques simples puisqu'il va se mettre en isothermie avec l'environnement pris, ici, pour un réservoir de température, c'est-à-dire doté d'une capacité de ramener le corps humain à égale température sans perdre, lui, en température pour autant. Mais, à l'évidence, ce n'est pas ce qui se passe. Au contraire, la température du corps se maintient à 37°Celsius alors que son entropie décroît. C'est ce qui nous pousse à penser que l'évolution n'est pas spontanée. Elle est plutôt régulée par un processus vital propre au système vivant. La figure ci-dessous illustre ce qui se passe plutôt chez le vivant.

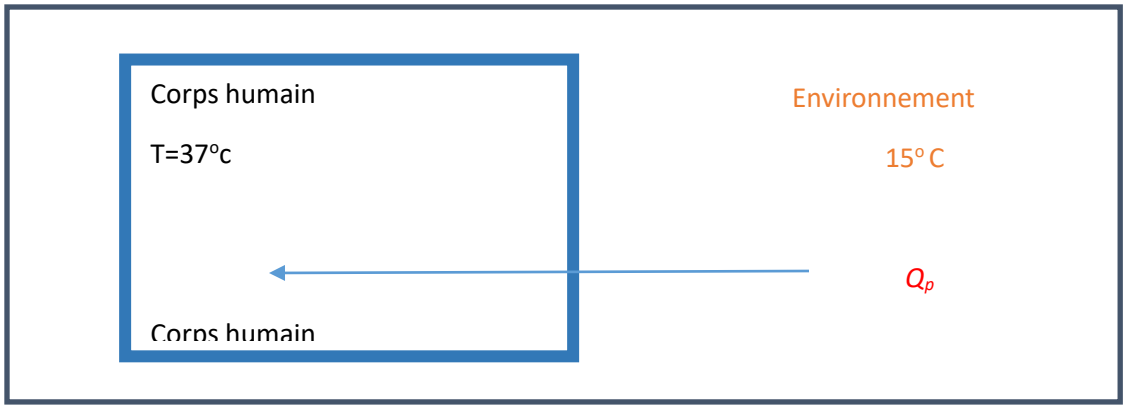


Figure 23 : Illustration de la situation réelle qui se passe dans la thermodynamique du vivant signifiant que l'évolution n'est pas spontanée

Il est donc question de rechercher la cause de cette évolution non spontanée qui fait que les systèmes vivants violent l'inégalité de Clausius et développent une situation d'évolution atypique. Ce facteur semble simplement être le mécanisme de fonctionnement vital qui n'est pas un fonctionnement mécanique, mais plutôt un fonctionnement intelligent et naturellement réglé : ce sont les processus physiologiques.

La question devient très complexe avec l'entrée en scène des processus physiologiques réglés et intelligents. On a l'impression de passer d'un simple mécanisme contrôlé par des lois physiques à une programmation intelligente : la biothermodynamique. La biothermodynamique c'est la thermodynamique du vivant qui intègre à la fois les lois physiques et phénomènes biologiques ou processus biologiques. George Matisse affirme que :

> Le groupe de phénomènes globalement dénommés LA VIE, - mot générique, - peut être défini par des caractères positifs : d'abord par des attributs objectifs constatables, particuliers aux êtres vivants, et, - signes distinctifs non moins importants, - par des Principes généraux et des lois spécifiques, convenant à leurs seuls modes d'activité (phénomènes biologiques) [...] Je définis celle-ci simplement : l'ensemble des phénomènes (qualifiés communément physiologiques), nés, par émergence, de processus physico-chimiques d'un genre particulier : ceux propres à des molécules nucléoprotéiniques optiquement dissymétriques, et composées entre elles en systèmes organisés à une plus haute échelle.[329]

Nous pouvons retenir que la biothermodynamique, qui développe un type de thermodynamique spéciale, prend en compte de lois physiques et biologiques, accompagnées de processus physico-chimiques d'un genre particulier. Nous pouvons donc en déduire que, entre l'entropie et la néguentropie, il y a un « je-ne-sais-quoique », quelque chose qui se résume en des *processus ou phénomènes vitaux*. La grande question est de savoir : quels sont donc ces phénomènes qui ramènent toujours l'entropie à sa plus petite expression ? Nous répondons, sur la trace Erwin Schrödinger, que c'est le métabolisme. Le métabolisme c'est l'ensemble des processus de transformation qui caractérisent le fonctionnement du vivant. Le mot métabolisme étant dérivé du mot grec μεταβαλλειν qui signifie échange, le métabolisme permet d'assurer les fonctions vitales chez le vivant, à savoir : la nutrition, l'élimination etc. La nutrition permet l'apport énergétique en énergie utilisable dont les cellules ont besoin pour fonctionner, tandis que l'élimination permet de se débarrasser de l'énergie usée dont elles n'ont plus besoin. Ce phénomène, qui passe par des processus très complexes, permet à un organisme vivant de réguler son entropie. Erwin Schrödinger confirme cela lorsqu'il affirme : « *How does the living organism*

[329]Georges Matisse, *A la source des phénomènes vitaux. Vers une bio-thermodynamique*, Paris Hermann & C[ie] éditeurs, 1954, *Op.Cit*,p. 3-4.

avoid decay? The obvious answer is: By eating, drinking, breathing and (in the case of plants) assimilating. The technical term is metabolism. The Greek word (μεταβαλλειν) means change or exchange. Exchange of what? Originally the underlying idea is, no doubt, exchange of material. »[330]Les processus vitaux sont donc le mécanisme par lequel le métabolisme est assuré chez le vivant, entre la nutrition et l'élimination. Mais jusque-là, nous sommes toujours dans une thermodynamique maîtrisable semblable à celle d'une machine thermique ordinaire. Il faut donc ajouter l'auto-régulation qui est un système de protection et de conservation intelligent auquel aucun système non vivant ne peut parvenir. L'auto-régulation assure conservation et le maintien de la vie. Cela passe par une réponse homéostatique face aux agressions et perturbations que peut connaître le système. Et ces fonctions sont intelligentes parce qu'elles sont contrôlées et coordonnées par le cerveau. Dans un document d'information sur le fonctionnement du cerveau en rapport avec l'homéostasie, nous pouvons lire :

> Ton cerveau est le centre de contrôle de ton corps. Il vérifie constamment que tous les systèmes fonctionnent correctement en communiquant avec les capteurs qui sont situés partout dans ton corps. Par exemple, les capteurs de température de ta peau peuvent détecter si ton corps est plus chaud que la normale. L'information de ces capteurs est transmise à l'hypothalamus, qui est une région de ton cerveau. L'hypothalamus réagit à l'information reçue en envoyant à son tour des messages via le système nerveux. Ces messages sont envoyés aux organes qui doivent alors réagir pour corriger la situation. Lorsque la température du corps revient à la normale, les récepteurs envoient cette nouvelle information au cerveau. Le cerveau envoie alors, aux organes concernés, le message qu'ils peuvent revenir à la normale.[331]

Cette capacité d'auto-régulation et d'homéostasie est la particularité des systèmes vivants, car c'est cela qui leur permet de réagir en répondant aux problèmes de croissance entropique qui peuvent survenir. Si l'ordre est troublé par une attaque (maladie, agent pathogène, agression etc.) ou bien, si le flux d'entropie venant de l'extérieur est trop grand, l'organisme tente alors de résoudre le problème en ramenant le milieu intérieur vers l'équilibre. Dans le document d'information sur le fonctionnement du cerveau en rapport avec l'homéostasie, on peut encore lire :

> Lorsqu'il fait chaud dehors, tu peux remarquer que ta peau devient plus rouge. Cette rougeur est due au fait que les vaisseaux sanguins de ton corps se dilatent pour transférer la chaleur à ta peau. C'est également pour cette raison que ton cœur bat plus vite. Il le fait pour augmenter la circulation sanguine vers la peau afin d'évacuer la chaleur. Ton corps réagit également à

[330] Erwin Schrödinger, *What is life? The Physical Aspect of the Living Cell*, (first printing 1944), Cambridge University Press edition, 1967, *Op.cit*, p.70

[331] https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/introduction-a-lhomeostasie-et-a-la-regulation

> l'augmentation de la chaleur en augmentant la production de sueur des glandes sudoripares. La sueur, qui est principalement de l'eau, permet de transférer de la chaleur par évaporation.[332]

Cela nous permet de comprendre que l'auto-régulation est un mécanisme intelligent. Le cerveau commande chaque organe pour produire une réponse adéquate par rapport aux informations que lui transmettent les capteurs nerveux. Or, sans cette fonction homéostatique d'auto-régulation, le système vivant ne serait pas différent d'un système non vivant. Il évoluerait irrésolument vers ma mort thermique en vertu du second principe énoncé par Clausius, à savoir que l'entropie augmente jusqu'au seuil d'entropie maximale. Donc, $S= S_{syst} + S_{ext} \geq 0$. Dans un système vivant, la formule de Rudolf Clausius se voit détournée par des processus vitaux qui luttent contre la croissance de l'entropie. Et pour cause, dans ces systèmes, il y a un troisième acteur qui s'interpose, à savoir les processus vitaux qui sont commandés par le cerveau chez les animaux. C'est cette complexité physiologique qui englobe les processus vitaux sous la coordination du cerveau que l'homéostasie est assurée. Quand bien même le désordre survient, il ne peut être maximal grâce à l'auto-régulation. L'information est tout de suite transmise au cerveau, celui-ci saisit la fonction spécifique responsable de l'action régulatrice en question. Une lutte pour le retour à l'équilibre intérieur se déclenche. A l'issue, l'entropie du système vivant va décroître, signe que le système a donné une réponse homéostatique. C'est en cela que le système vivant est différent des autres systèmes. C'est un système qui n'est pas simplement mécanique pour faire coulisser les lois physiques de manière automatique. Mais c'est un système de la plus haute complexité, dont toutes les fonctions concourent à une seule : le maintien. Et ce dernier est coordonné par une commande intelligente qui déclenche des réponses de façon automatique.

Tout compte fait, quand un système ouvert non vivant tend vers la mort thermique, on n'y peut rien. C'est une évolution fatale, car il agit selon les lois physiques en conformité avec les contraintes auxquelles il est soumis. La règle, pour un système non vivant, c'est, bien sûr, l'inégalité de Clausius, à savoir le deuxième principe de thermique qui décrit l'évolution de l'état entropique comme croissante. Mais les processus vitaux violent l'inégalité de Clausius. L'évolution thermodynamique n'est donc plus spontanée, mais contrôlée par le cerveau, centre de commande des processus vitaux. Cet état des choses suggère qu'on considère autrement

[332] *Ibidem*

l'entropie appliquée au vivant. L'homme étant le vivant par excellence, on va effectuer une transition du principe entropique au principe anthropique.

9.1.3. Thermodynamique du vivant : l'anthropie vainqueur de l'entropie ?

Cette formulation synonymique est loin d'être un simple jeu de mots. C'est une analyse qui a trait à la limite de la compréhension du vivant sur la seule approche entropique. Si les processus vitaux constituent le moyen qui entretient la baisse de l'entropie chez le vivant, du point de vue physiologique, le principe anthropique, quant à lui, peut être considéré comme la réponse philosophique à ce comportement spécial de l'entropie chez le vivant, et notamment chez l'homme.

Tout d'abord, reprécisons que l'entropie est une notion purement scientifique. Parler d'une thermodynamique de la vie, à partir de l'entropie, signifie que l'on rend compte du vivant à partir de l'entropie comme notion scientifique. Toutes choses qui seraient une sorte d'explication mécaniste. Le vivant se comprendrait sur la seule boussole scientifique. Or, nous venons de voir plus haut, à la section précédente (cf 9.1.2), que la physique n'a pas pu rendre compte à elle seule de la vie. A un certain niveau, la loi physique à savoir, l'inégalité de Clausius, se trouve violée par l'entremise des phénomènes vitaux. Il y a donc comme une limite de la loi physique (principe entropique) dans l'intelligibilité du système vivant.

Nous savons que, dans un système non vivant, l'entropie évolue dans une direction privilégiée respectueuse de l'inégalité de Clausius selon laquelle l'entropie augmente jusqu'à l'atteinte du seuil maximal. Mais cette évolution chez le vivant viole le sens grâce aux processus vitaux qui font évoluer l'entropie en sens contraire. Si le système vivant est donc spécial, *suis generis* parmi tous les systèmes, il faudrait peut-être lui adjoindre l'anthropie. De quoi s'agit-il au juste ?

Dans le concept d'anthropie, il y a la racine grecque *ανθρωποϛ* qui signifie l'homme. C'est un principe épistémologique proposé par l'astrophysicien Brandon Carter en 1974. De façon générale, c'est un principe qui met l'homme au centre de la compréhension de l'univers où finalement l'univers, dans son ensemble, n'a de sens que par rapport à l'homme en tant que sujet conscient qui l'observe. On retrouve donc un peu d'anthropocentrisme à l'intérieur de ce principe. On peut lire dans Wikipédia : *« Le principe anthropique est un principe*

épistémologique selon lequel les observations de l'Univers doivent être compatibles avec la présence d'un observateur étant une entité biologique douée de conscience et dotée d'une culture. »[333] Cela signifie que tout ce que l'on sait sur l'univers tout entier comme ensemble de tout ce qui existe, tout ce qu'on dit sur les systèmes, c'est l'homme qui le dit en tant qu'entité biologique et douée de conscience et de culture. Sans lui rien ne serait dit, rien ne serait sensé ; tout serait absurde. C'est cela le principe anthropique.

Parlant du principe anthropique, on distingue le principe anthropique faible et le principe anthropique fort. Dans sa version faible, le principe anthropique énonce que si l'univers avait évolué de telle enseigne que les processus d'évolution n'avaient pas permis l'apparition de sujets conscients, il n'y aurait aucun sujet conscient pour le remarquer, et par conséquent un tel univers n'aurait jamais existé. Il est qualifié de faible parce que, dans la probabilité de réalisation parmi les univers possibles, la probabilité pour que notre univers, dont l'évolution a donné lieu à des sujets conscients, existe est très faible. *A posteriori,* nous pouvons dire ceci: bien qu'il soit le plus improbable de tous les univers, notre univers existe bel et bien. C'est donc une chance que nous soyons là. Mais, s'il n'avait pas existé nous n'aurions pas à nous plaindre de la malchance y relative parce que nous n'aurions pas été là pour nous plaindre. Dans son dossier traitant de l'anthropie, nous pouvons lire dans le document posté dans le siteTechno-science.net, un site spécialisé, ce qui suit :

> Il [le principe anthropique faible] exprime que si l'univers avait évolué d'une manière qui ne permettrait pas à des entités conscientes d'y apparaître, aucune entité consciente n'aurait pas été là pour le remarquer, et donc qu'il n'y aurait de connaissance possible de cet univers ; autrement un tel univers n'aurait pas existé. Ainsi, les probabilités que nous avions d'apparaitre sont tellement faibles a priori que l'on est tenté de dire "quelle chance !"[334]

Le principe anthropique fait donc en sorte que le vivant - l'homme particulièrement - soit celui qui fait sens et qui donne sens au monde physique.

Dans sa version forte, il énonce l'idée d'une nécessité ou bien même d'une volonté intervenant dans l'évolution de l'univers, un peu comme si tout avait été mis en place pour que nous existions ; et que l'évolution avait pour finalité l'apparition de sujets conscients à un moment de l'histoire de l'univers. C'est pourquoi, on peut remarquer l'ajustement fin des lois physiques favorisant cette apparition. Dans le même site Techno-science.net, nous pouvons

[333] https://fr.wikipedia.org/wiki/Principe_anthropique
[334]https ://www. techno-science.net

encore lire : *« une variante plus religieuse connotée du principe anthropique énonce l'idée d'une volonté ou d'une nécessité intervenant dans l'évolution de notre univers. »*[335]

Le principe anthropique en général, et surtout le principe anthropique fort, met avant, le fait que, dans l'évolution de l'univers, il y a eu des ajustements fins de lois physiques pour qu'apparaissent la vie. Les lois physiques se sont déployées durant le cours de l'histoire de l'univers en se précisant pour que, à un moment donné, la vie et surtout une vie intelligente puisse jaillir. A propos de l'ajustement fin des lois de l'univers, on peut encore lire sur Wikipédia ce qui suit :

> En physique, la notion d'ajustement fin (en anglais : fine tuning) désigne la situation où un certain nombre de paramètres doivent avoir une valeur très précise pour pouvoir rendre compte de tel ou tel phénomène observé […]La notion d'ajustement fin de l'Univers, souvent mise à contribution pour démontrer le principe anthropique fort, est l'un des fers de lance des défenseurs de la thèse spiritualiste du dessein intelligent.[336]

La thèse de l'ajustement fin dont il est question dans cette citation introduit la notion de Hasard essentiel développée par Jacques Monod. Jacques expose le fait que la concaténation de lois déterministes, dans un univers très complexe comme la génétique, finit par engendrer une évolution statistique dont l'issue sera un être vivant. L'homme est dont le fruit d'un Hasard essentiel. Hasard, parce qu'on ne peut pas prédire les combinaisons de facteurs génétiques qui président à la survenue d'un individu, mais Hasard essentiel parce que cette survenue est guidée par des lois connues, même si ces lois commencent à échapper à l'observateur, à cause de leur complexité. Jacques Monod affirme :

> Le contenu du mot hasard n'est pas simple et le mot même est employé dans des situations différentes […] Mais dans d'autres situations, la notion de hasard prend une signification essentielle et non plus simplement opérationnelle. C'est le cas par exemple de ce qu'on peut appeler "coïncidences absolues" c'est-à-dire celles qui résultent de l'intersection de deux chaînes causales totalement indépendantes l'une de l'autre.[337]

C'est dans ce sens de Hasard essentiel comme rencontre de deux chaines causales qu'il rejoint le principe anthropique. Il dira que l'homme soit, dans l'univers le fruit du hasard, toujours entendu comme un hasard essentiel guidé par les lois physiques : *« L'ancienne alliance*

---

[335] *Ibidem*

[336] https://fr.wikipedia.org/wiki/Dessein_intelligent

[337] Jacques Monod, *Hasard et nécessité. Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*, éditions du Seuil, Paris, 1970, p 127-128.

est rompue. L'homme sait enfin qu'il est seul dans l'immensité indifférente de l'univers d'où il a émergé par hasard ».[338]Le principe anthropique vient du fait que l'homme sait qu'il soit seul, c'est-à-dire seul sujet conscient dont l'arrivée a été guidée par des lois finement ajustées. La survenue de l'ADN est un de ces ajustements fins qui a permis de passer de la physique à la chimie, et de la chimie à la biologie. L'ADN est l'élément fondamental du vivant qui comporte tout le plan génétique de l'organisme. Il est, en fait, une synthèse protéique d'atomes d'eau (H2O), de méthane (CH4), d'hydrogène (H2), et d'ammoniac. Ces molécules se sont ajustées pour former l'ADN dans l'atmosphère primitive prébiotique selon l'expérience de Miller-Urey[339]. Cet ajustement n'était pas du tout évident. La probabilité que cela se produise est très infime, sinon on verrait la vie naître de partout tous les jours dès lors que les quatre éléments sont réunis. Mais, malheureusement, cela fut unique. C'est pourquoi une étude menée sur le sujet indique que la probabilité pour que cela se réalise est plus longue que l'âge de la terre. On peut lire sur Wikipédia que

> Pierre Perrier aurait calculé la probabilité d'obtenir « par hasard » certaines protéines qui constituent les briques fondamentales de la vie en estimant le nombre maximal d'interactions moléculaires ayant eu lieu dans l'océan primordial où est apparue la vie. Chaque protéine est constituée de 20 acides aminés différents. Sa conclusion est que, quel que soit le chemin emprunté, la réalisation des différentes probabilités demande plus de temps que l'âge de la Terre (soit plus de 4,5 milliards d'années)5. Cette modélisation s'intéresse de ce fait à la création directe à un instant donné d'une molécule complexe sans phases intermédiaires, ce qui ne s'observe que rarement en chimie.[340]

Cette difficulté que les molécules ont à se réunir toutes seules au hasard pour créer des chaines de protéines, montre que l'ajustement fin des lois physiques a été guidé par un autre principe dont la finalité serait le vivant et spécifiquement l'homme.

Cela dit, revenons un tant soit peu sur ce qui constitue le cœur du débat, à savoir la dialectique du principe entropique et du principe anthropique. En nous appuyant sur ce que nous avons dit plus haut, à savoir que les phénomènes qui ont présidé à la survenue du vivant ont été guidés par des lois physiques, mais que ces lois se sont précisées et se sont ajustées de façon extraordinairement bien pour que le vivant soit un système tout à fait unique et spécial, faisant

[338] Jacques Monod, *Hasard et nécessité*, *Idem* p. 194-195.
[339] L'expérience qu'ont réalisée Miller Stanley et Harold Clayton Urey avait pour but de simuler les conditions qui régnaient dans la Terre primitive et comment les molécules se sont associées sous l'action des températures ambiantes pour donner naissances aux premiers éléments de la vie. Cf Stanley Miller.etUrey Harold Clayton, *« A Production of Amino Acids Under Primitive Earth Conditions »,* in *Science, Vol 117, nº 3046 1953, pp 528-529.*
[340] https://fr.wikipedia.org/wiki/Principe_anthropique

usage d'un mécanisme de fonctionnement intelligent qui régule les processus de stabilité vitale. C'est le principe anthropique. Il faut donc lire la vie chez le vivant comme une combinaison des deux principes. Le principe entropique, comme ensemble de lois qui permet de comprendre le comportement des énergies dans un système thermodynamique non vivant, et le principe anthropique comme l'ajustement fin de ces lois dans un système thermodynamique vivant.

Tout compte fait, le système vivant ne saurait uniquement se comprendre à partir des lois physiques brutes, mais à la lumière de ces ajustements fins qui se sont progressivement mis en place au cours de l'histoire de l'univers pour donner lieu à un système dont l'évolution thermodynamique défierait les autres systèmes par sa capacité d'être un sujet conscient, d'être un système différent des autres et lutter pour se maintenir comme tel. Ces ajustements fins ont fait que la thermodynamique du vivant déborde le simple cadre de l'analyse physique pour comprendre des domaines plus vastes comme :

- La chimie qui permet de comprendre comment s'effectuent les transformations engendrant des substances et des structures nouvelles
- La physicochimie qui étudie les liaisons chimiques des particules physiques chez le vivant. La physico-chimie qui rend compte de l'auto-organisation des molécules dans un système loin de l'équilibre où la matière commence à se structurer. Elle pourrait expliquer les premiers assemblages de briques de molécules à l'origine de l'ADN.
- La biologie qui étudie les organismes qui développent la vie.
- La physiologie qui étudie les fonctions et les propriétés des organes et des tissus des êtres vivants.
- La psychologie expérimentale qui étudie scientifiquement les comportements et les phénomènes mentaux chez un individu, etc.

Le fait que le système vivant déborde le simple cadre de l'analyse physique ouvre à sa multi-dimensionnalité, et par conséquent à la multidisciplinarité, pour le saisir. Il est désormais au carrefour de plusieurs sciences, car chaque ajustement fin des lois physiques constitue l'objet d'un nouveau domaine ou région de savoir. Nous pouvons donc dire que le vivant peut se saisir à partir de deux pôles :

- Les lois physiques simples qui existent dans l'univers : gravitation, constante de Hubble, la force de l'énergie noire, les quatre forces fondamentales etc. Ces lois vont se subtiliser à un moment pour créer des conditions favorables à l'émergence d'un type particuliers de systèmes d'où vont émerger les processus vitaux permettant au système vivant d'échapper aux mécaniques physiques brutes.

- L'anthropie qui permet d'introduire la notion de sujet conscient, de sujet intelligent dans le traitement du vivant. La thermodynamique du système vivant est donc commandée par un ensemble de processus vitaux intelligents qui contrecarrent les lois physiques lorsqu'elles font évoluer le système vers la mort. Car, l'intelligence, chez le vivant, est un système de défense qui consiste à comprendre le fonctionnement de la nature et de tenter de la défier, même comme la nature finit toujours par avoir raison.

9.2. Des principes d'immanence ou transcendance de la vie, à partir de l'étude des systèmes thermodynamiques

9.2.1. La limite d'une intelligibilité du vivant à partir du raffinement des lois de la physique

Il s'agit de répondre à la question de savoir si c'est le simple raffinement des lois et leur ajustement fin que nous rapporte le principe anthropique fort qui justifient le principe de vie chez le vivant. Les lois bien ajustées et excellemment précisées pourraient-elles déclencher la vie spontanément ? Auquel cas le mystère de la vie serait élucidé à travers ces dispositions hautement organisées des lois physiques dans les thermodynamiques. Pour cela, nous allons voir si le système vivant l'est *a priori* ou alors *a posteriori,* de même pour le système non vivant.

En effet, le système vivant n'est pas devenu vivant *a posteriori*. Il l'est *a priori* ; autrement dit il l'a toujours été. Cela signifie que ce n'est pas un ancien système non vivant qui a vu ses lois se raffiner, s'ajuster finement, et qui, à un moment donné, de manière spontanée, conformément aux lois d'auto-assemblage, des molécules se sont retrouvées ensemble et ont réalisé une synthèse protéique qui a enclenché les processus vitaux. A cela, nous pouvons répondre par la négative. La vie n'est pas le réveil d'un système non vivant qui devient vivant sous l'effet d'un ajustement des lois. Sinon, on observerait empiriquement des systèmes non

vivants s'activer et se transformer en des systèmes vivants. Il y a donc une différence fondamentale entre un système vivant et non vivant qui tient sur la transcendance et l'immanence de la vie. Pour cerner notre problème, il va falloir définir d'abord les concepts de transcendance et d'immanence.

En philosophie, parlant d'une chose ou d'un être, l'immanence désigne le caractère de ce qui a son principe en soi-même, par opposition à la transcendance, qui indique une cause supérieure. De ce point de vue, nous pouvons dire que le système non vivant n'a pas en lui un principe de vie. Ce principe lui est transcendant. Il ne réside pas dans la matière non vivante ; et à cela, on n'y peut rien. Il faut donc envisager le phénomène de la vie comme un phénomène qui transcende le système non vivant et les lois de la physique. On connaît, par exemple, les contraintes qui président à l'apparition de tel ou tel autre phénomène vital, mais on ne peut pas le reproduire. Ainsi connait-on les phénomènes qui président à l'apparition de la vie. Miller et Urey ont même simulé ces conditions dans un laboratoire, à partir de la connaissance qu'on a de la composition de l'ADN du vivant. Ils ont reproduit expérimentalement l'atmosphère prébiotique et les contraintes qu'il y avait dans les premières phases de formation de la terre, à l'ère dite précambrienne. Aujourd'hui, on connait avec plus ou moins d'exactitude la composition de l'ADN qui est à la base de la cellule. Mais, jamais personne n'a, à partir de ces lois, créer sa propre synthèse protéique pour avoir un ADN. Cela dit, il y a une différence fondamentale entre la vie et la non-vie. La vie pourrait bien se situer au-delà des lois physiques. On a estimé, à partir de la thèse du principe anthropique fort, que la vie serait le résultat d'ajustements fins de lois physiques qui ont créé un environnement favorable à l'émergence de systèmes particuliers développant certains processus exceptionnels capables de les détourner de la mort thermique en vertu d'une volonté intervenant au cours de l'évolution. Ainsi, tous les savants sérieux s'accordent sur le fait que la vie se trouve dans ces ajustements fins. Cependant, peut-on penser un jour que, des ajustements fins aux ajustements fins, de précisions accrues aux précisions accrues, on puisse produire la vie au sens vrai du terme ? En d'autres termes, peut-on procéder à des ajustements d'un certain nombre d'éléments dans un robot, dans une poupée et autres, pour que ces artefacts prennent vie ? Nous posons là une question rhétorique. De toute évidence, on sait très bien qu'ils resteront toujours des humanoïdes et des androïdes. Les humanoïdes sont des objets ayant les formes humaines, tout comme des androïdes qui sont des robots qui ressemblent

à des hommes. Leur nature est telle qu'ils resteront éternellement des artefacts. ? Il leur manque justement la vie, parce qu'ils ne font pas partie du monde des vivants. A l'état de nos connaissances, le vivant qui est un système thermodynamique particulier capable de réaliser des synthèses de fonctionnement vital par lui-même pour se maintenir, ne se trouve que dans la biosphère et plus précisément dans l'écosphère. Nous avons précédemment défini la biosphère, d'après Vladimir Ivanovitch Vernadski, comme le domaine du vivant assurant une thermodynamique de stabilité vitale, tandis que nous avons défini l'écosphère comme la maison du vivant réalisant une thermodynamique de l'existence vitale. En dehors de ce cadre connu et reconnu, la vie n'existe pas ailleurs. Nous pourrions donc dire que, pour ce qui est du système non vivant, la vie lui est complètement transcendante.

Avant Erwin Schrödinger, la physique ne s'occupait pas de l'entropie négative. Car l'entropie négative était surtout l'apanage des systèmes vivants. Le système vivant n'était donc pas pris en compte par la physique. En effet, le système vivant développe un processus étranger aux lois de la physique comme nous l'avant montré plus haut parlant de la violation de l'inégalité de Clausius $\mathbf{ds} = \int\frac{dQ}{T} > \mathbf{0}$ au chapitre 9.1.2. Ce processus se joue du deuxième principe de thermodynamique, en lui concédant des extensions. C'est avec Schrödinger que, pour la première fois, on parla d'entropie négative en physique. Toutes choses qui créèrent un tollé dans la communauté des savants. Car, la physique devait s'aventurer hors de son socle habituel, pour parler de la vie. Erwin Schrödinger sera considéré comme hérétique de la physique. Francis Bailly et Giuseppe Longo rapportent les critiques dont il a été affublé :

> Plusieurs fois des notions d'entropie négative ont été introduites en physique. Toujours écartées, la thermodynamique a su développer un cadre de grande envergure, sans recours à autre chose que ces grands principes (trois en général : conservation de l'énergie, non décroissance de l'entropie, absence de tout mouvement, donc de toute forme d'énergie, au zéro absolu) […] les réactions à ses quelques pages ont été aussi négatives qu'immotivées. Chez nombre d'auteurs, le rejet est dû au court-circuit habituel : l'organisation et la stabilité du vivant ne peuvent être comprises que dans les termes de l'organisation et de la stabilité du génome. Cette dernière est, bien évidemment, de nature physico-chimique et n'a donc pas besoin d'autres concepts que ceux qui viennent de la physique-chimie. Le très illustre Linus Pauling mène la danse de ces critiques Et sur ce point se centre un article qui en arrive quasiment aux insultes …Or, Schrödinger n'a pas de doute au sujet de la spécificité de la chimie du vivant, à laquelle il dédie 60% de son livre.[341]

[341]Francis Bailly et Giuseppe Longo, *Organisation biologique et entropie negative, Op.Cit.*

En effet, il ne s'agissait pas pour Erwin Schrödinger de parler de l'entropie négative que de parler de la vie même. Il intitulera son ouvrage : *Qu'est-ce que la vie ?* Il s'évertuera à expliquer la vie à partir de la physique. Ce qui reviendra, en fait, à une violation implicite du second principe tel qu'énoncé par Clausius, à partir duquel l'entropie est toujours croissante. Ainsi pour la première fois, la vie pouvait être étudiée par la physique. Tout récemment, Prigogine est allé plus loin encore avec l'étude des phénomènes dissipatifs. Mais, cela n'autorise pas de dire que la vie a livré le secret de la vie. Elle continue de se contenter de rendre compte des mécanismes de la vie, c'est-à-dire de ce qui se passe dans un système vivant du point de vue des divers échanges (métabolismes). Mais, elle n'en a guère le secret. Quand on dit qu'on maîtrise un phénomène en science, cela signifie que, à partir des lois qui entrent dans son fonctionnement, on peut le reproduire. C'est par exemple intéressant de voir les expérimentateurs s'amuser à reproduire le phénomène de lévitation magnétique de la supraconduictivité avec un aimant ou à faire bruler une bougie complètement immergée dans l'eau. C'est cela la maîtrise d'un phénomène : la capacité à le reproduire. Or, la physique découvre qu'il y a des systèmes qui sont vivants dans la nature et d'autres qui ne le sont pas. Elle ignore complètement comment s'est constituée cette différence. On apprend, par hypothèse interposée, que les lois de l'univers ont connu des ajustements fins. Or, ces ajustements ne sont pas une caution pour reproduire la vie. Un enchainement d'ajustements fins ne donne pas un système vivant. C'est pourquoi, la vie est envisagée comme transcendante. Le mécanisme physique ne saurait donc être responsable de la vie dans le système vivant. Il y a donc lieu d'envisager un principe de vie. Le système non vivant, lui, ne possède pas de principe de vie ; il fonctionne plutôt mécaniquement en vertu d'un certains nombres de propriétés physiques. Il fonctionne essentiellement à partir des échanges d'énergie. Et ce fonctionnement est à court terme ; il dure tant que cette énergie est capable de produire du travail. Le système non vivant s'identifie, à ce titre, aux phénomènes dissipatifs où qui décrivent le comportement de l'énergie aux bords du système (énergies échangées avec l'environnement). C'est pourquoi, on ne parle pas réellement de la vie du système ou de sa mort, mais plutôt de la vie ou de la mort de son énergie interne, quand celle-ci ne peut plus produire un travail. D'où l'expression mort thermique. C'est une mort au sens figuré. On sait que l'énergie ne meurt pas, elle se transforme. Cependant, le rôle de l'énergie dans un système étant de produire un travail ou du mouvement, si elle ne le peut plus, on considère que cette énergie est inutilisable ; ce qui implique la mort du système.

En effet, lorsque l'énergie potentielle est complètement dissoute dans l'ensemble de tout le système, et que l'on observe plus de mouvement à cause de l'équilibre total des variables thermodynamiques, observe une quiétude qui rappelle la mort. Ce n'est pas la mort du système puisqu'il n'a pas de vie en soi, mais la mort de son énergie qui passe de la phase utilisable à la phase non utilisable. Tout ici est mécanique, rien de vital. Ce n'est donc pas le système en lui-même qui vit mais sa chaleur. Dans le cas du système vivant, c'est le système lui-même qui vit, l'énergie lui permet seulement de réaliser du travail (bouger, parler, réfléchir etc.).

De façon simple, un système non vivant possède, en son sein, une vie thermique qui lui permet de réaliser des transferts de chaleur d'un endroit à un autre (énergie potentielle concentrée). Le transfert de chaleur se fait ici par convection thermique. Lorsque la chaleur s'est complètement dissoute et qu'elle ne peut plus produire un travail, alors ce système entre en mort thermique. Cela peut aussi être envisagé dans le cadre de l'énergie thermique qui est une énergie due à la température, à savoir le niveau d'interactions moléculaires dudit système. Si les interactions cessent et qu'il y a une égale distribution des variables intensives, le système entre en mort thermique

On remarque qu'ici, les lois, théorèmes et axiomes physiques tiennent la route de façon infaillible. Or, nous avons vu que le système vivant violait le second principe énoncé comme l'inégalité de Clausius, **ds =** $\int \frac{dQ}{T} > 0$ qui est le principe fondamental de la thermodynamique. A l'opposé, elle produit une entropie décroissante. De plus, il violait aussi le principe d'enthalpie où, au lieu de se mettre à température constante avec le grand système (univers ou environnement immédiat) avec qui il est en couplage de systèmes grand-canoniques en libérant une chaleur nécessaire à la réalisation d'une transformation exothermique pour être en équilibre thermique, le système vivant contourne ces lois en conservant la température de son milieu intérieur intact et invariable. Chez l'homme, cette température est de 37° Celsius alors que celle de son environnement est généralement de 15° Celsius. Toute la différence entre l'un et l'autre système se trouve au niveau des processus vitaux qui jouent un rôle conservatif pour les systèmes vivant en conservant la température malgré les échanges de matières et de travail. Alors que cette même température est dissipée dans l'environnement pour le cas des systèmes non vivants. Chez les systèmes non vivants, on ne fait nullement allusion à de quelconques processus vitaux parallèles. D'où le mécanisme général et généralisé du système non vivant. Or, nous avons vu que la vie en

tant que telle n'est possible que grâce aux processus vitaux qui sont autorégulateurs et homéostatiques. Ce sont eux qui font toute la différence et qui jouent un rôle conservatif vis-à-vis de la température dans un système ouvert, empêchant des dissipations qui engendreraient la mort thermique par égale répartition avec l'environnement. Lorsqu'on parle donc de la vie en tant que telle, il s'agit de la vie biologique et non pas thermique, dont l'appréciation se fait à l'one des processus vitaux. C'est pourquoi elle transcende le monde des systèmes non vivants.

Au regard de cela, on pourrait dire que la vie biologique est transcendante aux systèmes non vivants. Le vivant, lui, fonctionne concomitamment avec le mécanisme des lois physiques et les processus vitaux. Les lois physiques militent en vertu de la croissance de l'entropie tel que cela fut soutenu par les pionniers de la thermodynamique. Cependant cette croissance de l'entropie qui s'explique à partir des lois physiques est contrebalancée les processus vitaux qui développent des lois de la vie, en faisant baisser constamment l'entropie du système pour lui éviter la mort. La vie transcende donc les mécanismes simples des systèmes non vivants. Par contre, elle pourrait être immanente dans les mécanismes complexes des systèmes vivants.

9.2.2. Le triomphe des processus vitaux sur les lois physiques : du *désenchantement* au *réenchantement*[342] des lois physiques.

Nous avons vu que la vie comporte des subtilités qui ne peuvent se comprendre par la simple explication à partir des lois physiques. Le principe anthropique fort nous a fait savoir que les lois physiques ont dû se préciser de façon chirurgicale dans le cours de l'évolution de l'univers, ce que nous avons appelé *ajustement fin.* Ces ajustements ont permis que le plus improbable des univers possibles vienne au jour. Le principe anthropique faible a qualifié cela de chance inouïe. Or cette thèse nous semble très cocasse du fait qu'elle fasse appel à la stochastique. Nous savons que le hasard n'existe pas en science de l'avis de Pierre Henri Poincaré et d'autres savants comme Einstein. Pour le premier, le hasard, c'est l'ignorance des causes très petites qui ont présidé à l'occurrence d'un phénomène. Par ignorance de ces causes, on parle de hasard, de chance, aléatoire, bref de stochastique. Poincaré affirme que : *« Une cause*

[342]*Le désenchantement*chez Prigogine exprime le fait que la loi puisse rendre compte du réel considéré comme simple par la science classique. Tandis que le *désenchantement*exprime le fait que la loi doit se métamorphoser elle-même pour saisir un réel considéré désormais comme complexe par la science moderne. La loi physique doit donc prendre en compte d'autres situations non prévues par la théorie tels que les processus et phénomènes vitaux. D'où son *réenchantement*.

très petite, qui nous échappe, détermine un effet considérable que nous ne pouvons pas ne pas voir, et alors nous disons que cet effet est dû au hasard ».[343]Le second, à savoir Einstein, de son côté, face à l'indéterminisme prôné par l'école atomiste de Copenhague, affirme que *« Dieu ne joue pas aux dés. »*[344]La thèse anthropique basée sur la chance semble être un refus ou une mauvaise foi d'adhérer au principe anthropique fort qui consiste à admettre l'idée d'une volonté ou d'une nécessité intervenant dans le cours de l'évolution. C'est cette volonté qui serait alors responsable de ces ajustements fins. Quand on compare la texture d'un système non vivant et celle d'un système vivant, ce qui frappe l'observateur est d'abord l'organisation et la structure complexe. Un système non vivant est caractérisé par une texture simple. La physique peut se targuer de maîtriser les mécanismes et les lois des systèmes non vivants en raison de cette simplicité, mais elle ne peut pas avoir la même prétention face aux systèmes vivants qui sont infiniment complexes et intelligents, capables de s'autogérer, de s'autoréguler voire de s'adapter aux conditions extérieures, en développant des aptitudes qu'on ne leur reconnaissait nullement au préalable. Régis Jolivet poursuit en disant :

> Les minéraux sont composés de parties intégrantes homogènes, si bien qu'il suffit de les diviser pour les multiplier. Les êtres vivants, au contraire, sont hétérogènes : qu'il s'agisse de plantes ou d'animaux, il y a une diversité de parties, de membres et d'organes. Pour composer un végétal, il faut une racine, une tige, des feuilles et chacune de ces parties offre elle-même une complication extrême. Chez les animaux supérieurs, la complication est plus grande […] La moindre cellule, végétale ou animale, porte toujours le même caractère d'hétérogénéité, d'organisation complexe d'éléments de nature diverse […][345]

De ce qui précède, nous comprenons que les vivants sont loin d'être simplement des systèmes mécaniques. Ils sont animés de principe de vie, non en vertu des lois mécaniques et des principes thermodynamiques, mais en vertu des processus vitaux inhérents et internes. On pourrait parler d'une immanence de la vie dans les systèmes vivants. Ils abritent la vie, par principe. Cette vie ne s'est pas activée à un moment de l'histoire, sinon on la verrait s'activer lorsque les mêmes conditions sont réunies.

En tout état de cause, la vie se laisse percevoir comme est une œuvre transcendante dans un système non vivant ; elle n'y réside pas, tandis qu'elle y réside, par principe, dans un système

---

[343] Henri Poincaré, *Science et méthode*, (1908), livre II, consulté en ligne dans wikisource.

[344] Actes du Congrès de Solvay in Robert Paris, *Pourquoi Einstein affirmait que « dieu ne joue pas au dé »* ?*extrait du site https:// wwwmatiereevolution.fr du 19 février 2017.*

[345]Régis Jolivet, *Traité de philosophie, introduction générale logique cosmologie*, 4e édition, Emmanuel Vitte éditeur, *Op.Cit*, p. 438.

vivant. Les lois physiques ne suffisent pas à elles, toutes seules, pour définir un système vivant, bien qu'ils y participent. Il aurait encore fallu qu'elles passassent par des ajustements fins. Car, sans ces raffinements et ces ajustements très fins, le système vivant ne pourrait pas réaliser des processus qui développent la vie. Cependant le raffinement de lois n'est pas le principe de vie comme nous l'avons montré plus haut, au risque de confondre le principe vital avec le raffinement des lois physiques. On peut, tout au moins, dire que le raffinement des lois ou leur ajustement a coïncidé avec les processus vitaux. Une volonté aurait communiqué la vie dans les structures préalablement organisées dans lesquelles celle-ci pouvait tenir sans s'éteindre, c'est-à-dire les structures qui pouvaient la maintenir et l'entretenir. C'est pourquoi ces principes vitaux ne peuvent que se reproduire d'un système vivant à un autre, suivant les lois finement ajustées de la matière vivante. Cela étant, les processus vitaux jouent un rôle régulateur et homéostatique face à l'entropie, à partir de l'expérience qu'elles ont des systèmes non vivants ou morts dont ils ont vu l'entropie croître fatalement. C'est la propriété de l'apprentissage. Les systèmes vivants sont capables d'apprentissage.

Soit un raisonnement par l'absurde, en admettant que c'est le raffinement des lois, leur précision chirurgicale, leur ajustement fin et leur complexité accrue dans le vivant qui soient le principe de la vie. Face à ce raisonnement, l'inquiétude demeure. Rien n'est acquis, au contraire, rien ne rassure. Pourrait-on produire la vie si tout ceci était réuni ? Nous doutons fort, comme nous l'avons montré dans la section précédente. Non seulement les lois sont extrêmement enchevêtrées qu'il devient très difficile de les démêler pour prétendre les connaître comme on estimait jadis que le génie de Laplace connaîtrait les états du monde, mais en plus les processus vitaux sont un concept difficile à cerner. Quand bien même cette prétention naïve d'une connaissance des états du monde à partir des lois serait possible, elle ne permettrait pas que l'on reproduise la nature de la nature, à savoir ce qui fait exactement que le système vivant soit vivant, à la différence du système non vivant. A l'état de nos connaissances, on sait que le vivant ne peut que se reproduire lui-même comme porteur d'un principe propre aux organismes vivants. Ici, on se saurait privilégier une approche mécanique où tout se comprend à partir des lois physico-mathématiques. La science classique qui fut une *science désenchantée*[346], c'est-à-dire une

[346]Selon Prigogine, nous pouvons décrire la science classique comme une science désenchantée, c'est-à-dire une science qui fut régie par des lois mathématiques. Elle est venue ainsi balayer le paradigme d'un monde enchanté (monde des incantations, de la magie, des oracles ; un monde fortement théologique celui du Moyen-âge dominé par

science qui s'est défaite de certaines considérations moyenâgeuses de nature mystico-religieuse en faveur d'un légalisme et d'un déterminisme stricts, s'est vue rattraper dans son cours par la résurgence de nouvelles questions tellesque la religion, la croyance, la spiritualité etc. D'où le *réenchantement* scientifique, c'est à-dire le fait que la science a combiné à la fois la loi avec d'autres principes, entre autres, comme Dieu, la transcendance, la spiritualité. Prigogine estime que la loi n'a pas disparu pour autant, mais, c'est le légalisme qui a disparu. On peut plus sacrifier uniquement à l'autel de la loi. Ainsi, à elle seule, la loi physique ne peut pas rendre compte des phénomènes vitaux. Ces phénomènes peuvent se lire à partir d'un principe vital immanent dans le vivant. On ne saurait donc dire avec exactitude ce qu'est la vie. Erwin Schrödinger estimait que la vie se sert de l'entropie négative sans répondre à la question de l'essence même de la vie. On sait que la vie se sert de l'entropie négative comme son carburant, sa nourriture, mais elle échappe au mécanisme. Il ne faut pas la rechercher dans les mécanismes purs des systèmes, sinon il y aurait des ingénieries de la vie, des usines de la vie dont les physiciens seraient des ingénieurs, connaissant les lois thermodynamiques. Autant le dire, la vie est un principe qui déborde le cadre empirique et expérimental. La physique, en tant que paradigme des sciences expérimentales, ne saurait réellement en parler avec fierté. Car, elle s'inscrit avant tout dans la perspective d'une science expérimentale. C'est pourquoi elle a longtemps bercé l'illusion d'une maîtrise du secret de la vie à partir d'un certain nombre de lois. Mais, cela s'est avéré insuffisant pour parler de la vie. On la voit, on la ressent, on la vit, on la transmet, mais on ne la saisit pas. Elle est dans les systèmes vivants développant des processus vitaux qui coïncident avec l'ajustement fin des lois. C'est pourquoi nous disions que la loi n'a pas complètement disparu, mais elle ne suffit plus pour tout expliquer dans la perspective du *réenchantement scientifique*[347]. Le système vivant est donc une chaine causale de coïncidences entre ajustement fin des lois physiques et processus vitaux, ce qu'on pourrait qualifier de hasard essentiel[348]. La preuve que la vie y est immanente dans le vivant est que le système non vivant ne s'est jamais activé sur la base des lois de la vie pour devenir un système vivant. Il a évolué sous différentes formes, en

---

le paradigme religieux. Mais la science enchantée sera déclassée à son tour par la science réenchantée (une science moderne où la loi a été détrônée de son piédestal, une science indéterministe et relativiste)

[347] Expression de Prigogine pour décrire la science moderne affranchie de déterminisme et du légalisme stricts.

[348] Commentant Egard Morin dans son livre *Hasard et nécessité*, j'avais montré dans un précédent travail que le *Hasard essentiel* serait en même temps proche de l'indéterminisme qu'éloigné de celui-ci parce qu'il conserve une part de déterminisme. Biologiste et généticien, Edgard Morin montre que nous ne sommes nés ni par chance ni par la force des lois génétiques rigoureuses d'une nature biologique déterministe mais d'un croisement de nombreuses chaînes de déterminismes qui finissent par donner un résultat statistique.

s'adaptant à chaque fois aux contraintes environnementales, et en créant des nouvelles espèces par le phénomène de la dérive de l'espèce, ainsi que l'atteste l'évolution des espèces vivantes. Il abrite dans la vie qui s'est enclenché à un moment de l'histoire de l'univers tant et si bien que certains systèmes bénéficient du principe vital par transmission de ce principe et des lois physiques qui se sont ajustés dans le cours de l'évolution, suivant le mode de reproduction et les lois de transmission des caractères. Par contre, d'autres systèmes ne bénéficient guère de la vie, car ce principe vital leur est transcendant en vertu de la non-coïncidence de l'ajustement fin des lois et les processus vitaux. Cependant en le disant, ne serait-on pas en train de faire un anthropocentrisme déguisé où la vie est réductible à la vie biologique. Ainsi la terre est-elle la seule planète où il y a des êtres vivants, et rien en dehors de l'espace circonscrit par l'homme comme domaine du vivant, ne possède de principe de vie. A ce niveau nous nous demandons si l'homme ne parle pas de l'univers à partir de sa position dans cet univers, ce qui revient à se demander s'il ne se cherche pas lui-même en projetant ses catégories partout dans l'univers. N'est-il pas à la recherche de vies humanoides et des androides ? Toutes choses qui pourraient le faire manquer de voir la vie autrement. Aussi allons-nous faire appel à une approche émergente qui fait éclater le concept de vie au-delà la biosphère : LA *LYFE* contre LA *LIFE*.

9.2.3. La porte ou récit d'une approche émergente. Autrement la vie de la *life* à la *lyfe*

Dans cette section, nous allons essayer de faire éclater la notion de vie en dépassement des deux premières sections qui sont, à n'en point douter, réductrices de la vie aux formes de vie qui tombent immédiatement sous les sens du sujet humain. Nous allons nous servir de l'approche émergente pour introduire une nouvelle perspective plus large de la vie, d'après deux chercheurs en exobiologie, à savoir Stuart Bartlett et Michael L. Wong. Ces derniers introduisent officiellement la notion de *lyfe* en essayant de recadrer la définition de la vie pour la faire correspondre à des activités dynamiques qui vont au-delà de la vie connue sur la terre. Ils présentent ainsi le concept de *lyfe* : *« We seek to reframe the definition of life in a more expansive way while recognizing the need to signify the specific kind of life that earthly forms represent. Thus, we have come up with a new term - lyfe. Henceforth, we will refer to life (as we know it)*

and lyfe (as it could be, in the most general sense). »[349]De toute évidence, nous avons affaire à un terme émergent qui permet de sortir de l'impasse qui consiste à confiner la vie à un infime point perdu dans l'immensité de l'univers appelé *Terre*, toutes choses qui nous évitent de cristalliser le concept de Vie dans les catégories de la terre. Ainsi, la *vye* serait une forme plus large, et la vie serait une forme spécifique développée sur la terre.

En effet, l'approche émergente est une approche philosophique qui fait émerger un courant nouveau ou novateur qui s'appuie sur les éléments fondamentaux des courants précédents tout en évitant tout réductionnisme. L'approche émergente affirme que *le tout est plus que la somme des parties*. Un courant peut être qualifiée d'*émergent* si celui-ci découle de courants plus fondamentaux tout en demeurant nouveaux ou irréductibles à ceux-ci. O'Connor et Hong Yu Wong insistent sur le côté innovant du concept émergent sans léser les propriétés fondamentales des courants précédents. Ils précisent : *« We might roughly characterize the shared meaning thus: emergent entities (properties or substances) 'arise' out of more fundamental entities and yet are 'novel' or 'irreducible' with respect to them. »*[350]L'approche émergente que nous envisageons se propose de faire éclater le principe de vie en tenant compte à la fois du mécanisme des lois physiques et du vitalisme sans se réduire à deux courants.

> En exobiologie, la *lyfe* est une forme généralisée de la vie. C'est la vie telle que l'on peut exister ailleurs dans l'univers en dehors des formes de vie trouvées sur terre. Dans Wikipédia, dans la section qui est réservée à la *lyfe*, on peut lire que " le concept de *lyfe*" (prononcé [lɔif], "loïf "), un néologisme dérivé de l'anglais *life* (« vie ») que l'on peut traduire par " *vye"*, "le vyvant" (également des néologismes) ou « vie universelle », est un essai de définition de ce que pourrait être la vie en général, au-delà des définitions restrictives de la vie sur Terre. [351]

Cela dit, l'homme doit être plus attentif à ce qui se passe dans les systèmes que l'univers offre à voir. Il devra désormais observer l'univers avec un regard plus neutre débarrassé d'anthropomorphisme, c'est-à-dire la recherche des formes humaines. L'on pourrait bien trouver la vie sous d'autres formes. Ainsi, on pourrait rechercher non plus le vivant, c'est-à-dire des systèmes qui développent une vie biologique comme celle qu'on retrouve dans la biosphère et l'écosphère terrestres, mais le *vyvant*, c'est-à-dire un système développant plutôt la *vye*, entendu comme des systèmes développant d'autres formes de vie. A partir de là, la vie pourrait être plus répandue que l'on ne le croyait dans l'univers. La *lyfe* prend source dans les propriétés

[349] Stuart John Bartlett et Michael L Wong, *« Defining Lyfe in the Universe: From Three Privileged Functions to Four Pillars »*, Life, vol. 10, no 4, 16 avril 2020, p. 42
[350] O'Connor et Hong Yu Wong, « Emergent Properties », dans The Stanford Encyclopedia of Philosophy, 2012
[351]https://fr.wikipedia.org/wiki/Lyfe_(astrobiologie)

fondamentales de la thermodynamique en y ajoutant les propriétés fondamentales de la vie biologique sans toutefois se réduire à une de ces formes de vie. Ainsi, elle se base sur quatre propriétés fondamentales plus généralisantes de la *vye*. Ces propriétés sont : la dissipation, l'autocatalyse l'homéostasie, l'apprentissage. C'est ce que nous disent ceux qui ont forgé ce concept, à savoir Stuart Bartlett et Michael L. Wong qui, en définissant le concept de *lyfe,* lui trouve ces quatre propriétés. Ils affirment ceci :

> Motivated by the need to paint a more general picture of what life is - and could be - with respect to the rest of the phenomena of the universe, we propose a new vocabulary for astrobiological research. *Lyfe* is defined as any system that fulfills all four processes of the living state, namely: dissipation, autocatalysis, homeostasis, and learning. Life is defined as the instance of *lyfe* that we are familiar with on Earth, one that uses a specific organometallic molecular toolbox to record information about its environment and achieve dynamical order by dissipating certain planetary disequilibria. This new classification system allows the astrobiological community to more clearly define the questions that propel their research - e.g., whether they are developing a historical narrative to explain the origin of life (on Earth), or a universal narrative for the emergence of *lyfe*, or whether they are seeking signs of life specifically, or *lyfe* at large across the universe. While the concept of "life as we don't know it" is not new, the four pillars of *lyfe* offer a novel perspective on the living state that is indifferent to the particular components that might produce it.[352]

Pour mieux comprendre ce point de vue soulevé par Stuart Bartlett et Michael Wong, nous allons essayer d'étayer ces quatre caractéristiques de la *lyfe.*

La dissipation est un processus fondamental des systèmes ouverts. C'est lui qui permet au système ouvert de pouvoir réduire son entropie et d'éviter le mort thermique. Un système capable de développer des dissipations est un système qui a des chances de ne pas entrer en mort thermique, du moins pour un temps. Les phénomènes dissipatifs engendrent des fluctuations qui créent l'éloignement à l'équilibre donnant lieu à l'auto-assemblage de la matière, preuve que son entropie diminue au cours du temps. Le système évite ainsi la mort thermique et reste actif du point de vue énergétique. Bref, un pareil système présente deux aspects : il présente une organisation due aux dissipations et produit une entropie négative. Stuart Bartlett et Michaël Wong affirment à propos que *« Lyfe cannot exist at equilibrium. The second law of thermodynamics, in the presence of free energy transduction mechanisms, permits the coupling of exergonic processes to the endergonic, organized configurations of lyfe. »*[353]C'est là une

[352]Stuart John Bartlett et Michael L Wong, *« Defining Lyfe in the Universe: From Three Privileged Functions to Four Pillars »*, Life, vol. 10, no 4, 16 avril 2020, *Op.Cit*
[353]Stuart John Bartlett et Michael L. Wong, *Idem*

caractéristique que l'on peut tirer de la thermodynamique des systèmes non vivants pour l'intégrer dans la catégorie émergente. Le second aspect, et pas le moindre, c'est l'autocatalyse.

L'autocatalyse est le processus émergent dans la biologie moderne ; elle est un processus qui se trouve à la base des réactions chimiques dont le catalyseur figure parmi les produits de réaction. Olga Taran et Von Kiedrowski définissent l'autocatalyse comme *« une catalyse par un ou plusieurs produits d'une réaction. L'autocatalyse peut être considérée comme la condition minimale pour l'émergence de la vie. »*[354]L'autocatalyse permet la prolifération et l'accroissement du système étudié grâce à des réactions d'autocatalyse. Ainsi, le système peut gagner en population au cours du temps manifestant qu'il est actif à certains égards. Stuart Barltlett et Michaël Wong soulignent cet aspect:

> The ability of a system to exhibit exponential growth of representative measures of size or population in ideal conditions. The property of autocatalysis can appear in different forms - including self-catalysis, cross-catalysis, and network autocatalysis - as long as the effect leads to exponential growth of a suitable metric under ideal conditions.[355]

L'autocatalyse est un aspect qui permet la prolifération à défaut de la reproduction. En effet, il y a des systèmes qui prolifèrent sans se reproduire. Ils peuvent donc se répandre et s'accroître. C'est donc un aspect important. Mais cela ne suffit pas, il faut encore que le système puisse être homéostatique.

L'homéostasie, quant à elle, est un aspect très important qui permet à un système de conserver son équilibre intérieur et de revenir à l'ordre en cas de perturbation ou de dysfonctionnement. Il permet au système de se maintenir assez longtemps. A propos de l'homéostasie, on peut lire sous la plume de Stuart Bartlett et Michaël Wong ce qui suit : *« The ability of a system to maintain key internal variables within ranges of ideal set points. In a dynamic world of perturbations, coupled with the exponential growth described above, a lyving system must have means to limit the variation of its internal systems when external conditions change. »*[356]Sans le développement de cette capacité, le système entre en mort thermique, car les contraintes extérieures risquent de ramener sa température à la température constante à l'environnement, conformément au principe des transformations à température constante. Le

[354]Olga Taran. et Günter Von Kiedrowski, *Autocatalysis*. In : Gargaud et al, Encyclopedia of astrobiology, Springer, Berlin, pp 128-129.
[355]Stuart John Bartlett et Michael L. Wong, *Idem*
[356]*Ibidem*

système doit donc pouvoir se protéger pour avoir des contraintes qui ne dépendent pas de son environnement. L'homéostasie est donc capitale pour la *vye*, sans qu'elle soit autosuffisante. C'est pourquoi un système *vyvant* système doit également savoir apprendre à partir de sa propre histoire. Les virus et autre protéine savent apprendre en développant des mutations et des résistances. Qu'en est-il donc de l'apprentissage

L'apprentissage est un aspect très important à prendre également en compte. Un système qui ne peut pas apprendre ne pourra pas s'adapter aux changements. Un système *vyvant* doit est flexible aux nouvelles conditions et aux nouveaux modes d'existence. Cela passe par la prise d'informations sur son environnement intérieur et extérieur pour qu'il puisse développer des réponses adaptées. Stuart Bartlett et Michael Wong: *« The ability of a system to maintain key internal variables within ranges of ideal set points. In a dynamic world of perturbations, coupled with the exponential growth described above, a lyving system must have means to limit the variation of its internal systems when external conditions change. »*[357]Les systèmes qui peuvent apprendre démontrent, à suffisance, qu'ils ont des mécanismes proches de l'intelligence; ils miment l'activité cérébrale. Ces activités et processus d'apprentissage pourraient bien être opérés par des programmes qui ne sont pas nécessairement connectés à une activité cérébrale ou neuronale. Stuart Bartlett et Michael Wong expliquent, en disant:

> There is a growing list of non-neural learning systems, including gene regulatory networks, protein interaction networks, and other epigenetic mechanisms. Many examples fall under the general framework of associative learning, which has been exhibited by non-neural organisms such as slime moulds. Darwinism mingles with these other learning processes (and perhaps other hitherto undiscovered forms) to create the incredible diversity and complexity of the biosphere. Hence, "learning" is an umbrella term for this large and incompletely understood set of processes.[358]

L'auteur présente une liste de systèmes non-neuronaux qui possèdent des processus d'apprentissage ; il explique par la suite qu'il existe une diversité et complexité de systèmes dans la biosphère qui ont cette capacité. Parmi eux, il y a un large éventail de processus d'apprentissage qui ne sont pas totalement connus. Ce qui est bon à savoir c'est qu'il n'y a pas que les systèmes intelligents non contrôlés par le cerveau et son système périphérique qui peuvent apprendre et développer des processus adaptatifs grâce à la prise d'information sur l'environnement intérieur et extérieur.

---

[357]*Ibidem*

[358]Stuart John Bartlett et Michael L Wong, *Idem*

Tout compte fait, un regard sur l'univers en général nous permet de voir, de comprendre et de rechercher la vie autrement que sous la forme classique qui reposait sur un pilier biologique et physiologique, à savoir les processus vitaux. Ainsi, l'approche émergente étend la réflexion sur des systèmes qui ne développent pas absolument de bio-thermodynamique, mais dont la thermodynamique présente des caractéristiques très voisines des systèmes vivants classiques sans qu'ils ne le soient réellement. Ces systèmes, bien qu'ils soient mécaniques, peuvent faire décroitre l'entropie de façon contrôlée, développer des autocatalyses, donner des réponses homéostatiques par rapport à la différence de température entre l'extérieur à l'intérieur du système ; ils peuvent apprendre, de surcroît. La *vye* est le nom donné à ce large éventail de systèmes. Ce sont des vyvants, et on peut les retrouver en dehors de la terre. La spécificité de la *vye* ou de la l*yfe* est qu'elle laisse aussi observer l'ajustement fin des lois, comme dans le vitalisme, à la seule différence qu'elle n'intègre pas les processus vitaux dans l'extension du concept. Car, ces lois et principes sont si subtils et fins que tous les systèmes ne peuvent pas les avoir bien qu'ils augmentent le nombre de *vyvants* comparativement à l'approche classique de la vie. L'approche émergente rejoint le mécanisme sur le fait que tous les processus sont basés sur les mécanismes physiques normaux et ordinaires de la thermodynamique. De ce point de vue, si on s'en tient à la *vye* présentée sur cette forme, on pourrait la voir comme un simple mécanisme physique qui ne déborde guère le champ des sciences physiques et précisément celui thermodynamique.

CONCLUSION PARTIELLE

La troisième partie nous a permis de marquer la rupture épistémologique sur un certain nombre d'aspects. Premièrement, elle nous a permis de préciser avec quel principe lire la production des entropies locales. Celle-ci se fait sur la base du deuxième principe. Elle nous a appris, par ailleurs, à lire la production de l'entropie universelle sur la base du troisième principe. L'entropie universelle elle-même se formule, non plus à partir de la formule de Boltzmann, mais bien plus à partir la formule de Max Planck. Cette reformulation estime que l'entropie de l'univers décroît avec la chute de sa température. Par ailleurs, ces acquis sur l'entropie devraient nous aider à capitaliser la thermodynamique au quotidien, depuis le système planétaire, jusqu'à l'homme en passant par tous les intermédiaires. En revanche, elle nous a permis de mettre l'entropie en rapport avec la vie, en nous demandant si l'entropie pouvait être valablement traitée comme synonyme de vie. A la question : *« qu'est-ce que la vie ? »*, nous avons répondu qu'il y a, d'une part, la vie biologique limitée à la biosphère (domaine du vivant). Elle intègre l'entropie négative et les processus vitaux. On parle alors du vivant. D'autre part, il y a la *vye* plus large, qui intègre des principes thermodynamiques fins parmi lesquels l'entropie négative, et qui se maintient sans processus vitaux. On parle alors du *vyvant.* Cette nouvelle forme de vie est plus répandue dans l'univers. A défaut donc de chercher en vain les vivants sous des formes humanoïdes et androïdes, l'homme pourrait chercher le *vyvant*, c'est-dire des vies différentes de la sienne, réalisant une activité thermodynamique très intelligente sans processus vitaux.

CONCLUSION GENERALE

Rendu à la fin de ce long périple réflexif risqué et risquant où nous avons mis la nature à l'épreuve de la physique, il importe de rappeler le problème principal qui a guidé la recherche et les conclusions auxquelles nous sommes parvenues.

Cela dit, il a été question d'une réflexion philosophique notamment, d'une recherche épistémologique sur le comportement de l'entropie dans les systèmes thermodynamiques en général avec un accent particulier dans les deux niveaux essentiels de la thermodynamique, à savoir le niveau local et le niveau universel. Il était question de réévaluer le sens de l'entropie en thermodynamique en prenant en compte les différents systèmes possibles : isolés, ferlés et ouverts. Notre intérêt étant que la catégorie concernée, à savoir l'entropie, joue un rôle dans la destinée humaine. Car, sa croissance signifierait la mort de la nature dont l'homme fait partie, tandis que sa décroissance signifierait la vie de cette même nature. Sa croissance et sa décroissance sont donc des préoccupations existentielles de première importance au point où Boltzmann, l'un des fondateurs de la thermodynamique, en soit mort d'anxiété à l'idée d'une croissance exclusive de l'entropie de l'univers. Il a donc été question de réévaluer le sens de cette entropie où se joue la destinée de l'univers, sa croissance signifiant l'augmentation du désordre cosmique et sa décroissance exprimant l'augmentation de l'ordre cosmique d'où le titre : *De l'entropie locales à l'entropie générale, une théorisation de l'ordre cosmique*.

Le niveau local nous a permis de parler des entropies au quotidien. Car, si tout peut être considéré comme un système thermodynamique, fort du fait qu'un système thermodynamique c'est toute portion de l'univers limitée par des frontières réelles ou fictives, nous pouvons dire que nous avons affaire à des systèmes thermodynamiques au quotidien, qui nous offrent divers types de comportements entropiques. Nous voyons des entropies croissantes à travers les systèmes organisés, de la même manière, nous voyons des entropies décroissantes à travers les systèmes qui évoluent vers le désordre. Fort de cela, nous pouvons établir que l'entropie n'a pas de direction privilégiée en thermodynamique, contrairement à ce que les pionniers de la thermodynamique avaient établi. Nous soulignons que ces derniers n'avaient pas tort. Mais, c'est la généralisation qui pourrait poser problème dans la mesure où leurs travaux portaient sur les

machines à vapeurs et les moteurs dont l'entropie signifie pertes irrécupérables et inévitables. Dans ce contexte, la croissance exclusive de l'entropie pouvait faire sens. De là à généraliser la croissance entropique dans les systèmes isolés, ouverts et fermés pose un énorme problème à la thermodynamique. Aussi avons-nous montré que, non seulement un système isolé n'existe pas, en dehors de l'univers lui-même, mais aussi l'entropie peut bien croître même dans les systèmes isolés à cause des fluctuations internes qui sont parfois dues au hasard. Or, les fluctuations empêchent l'entropie d'être maximale. De plus, le théorème des fluctuations établit que le deuxième principe de thermodynamique, qui milite en faveur d'une croissance d'entropie dans un système isolé, n'est que statistique et non pas nécessaire. D'autre part, les systèmes isolés et ouverts nous font voir une entropie bidirectionnelle. Dans ces systèmes, l'entropie peut augmenter ou diminuer selon les contraintes imposées au système. Donc, du point de vue des entropies locales, nous sommes parvenus à la conclusion que leurs entropies peuvent croître ou décroître.

En ce qui concerne le niveau universel, nous sommes arrivés à la conclusion que l'entropie de l'univers décroît au cours du temps, et ce pour plusieurs raisons. La première raison s'est basée sur le fait que la température régnante dans le point initiale aurait été au voisinage de l'infini. La détente adiabatique de l'univers sous l'effet de l'expansion causée par l'énergie noire permet à la température de diminuer au cours du temps, selon la deuxième loi des gaz parfaits qui stipule qu'à pression constante, la température est inversement proportionnelle au volume. Cela signifie simplement que lorsque le volume de l'univers s'accroit sous l'effet de l'expansion, sa température diminue. Des expériences ont été menées aboutissant à une chute progressive de cette température depuis le premier rayonnement du corps noir 380 000 ans après le big bang où elle fut de 3000 Kelvin. Aujourd'hui d'après la découverte de Arnold Penzias et Robert Wilson en 1965, elle n'est plus que de 2,7 K, seulement deux degrés au-dessus du zéro absolu. Nous avons également estimé le fait que l'univers a gardé sa mémoire. Les systèmes chaotiques sont des systèmes qui ne gardent pas leur mémoire. Ce sont des systèmes dont l'état actuel ne permet pas de remonter leur passé à cause du chaos existant. Or, ce n'est pas le cas de l'univers. Nous avons estimé que le big bang ne s'est pas fait à la manière d'une bombe qui explose ou d'un feu d'artifice projetant des émissions et des débris au loin partout dans l'univers. Sinon, l'univers aurait été une scène de billard aux collisions incessantes jusqu'à ce que toute cette énergie soit dissoute et parvienne à la mort thermique. Or, plusieurs théories prouvent que l'univers ne court

pas vers une mort thermique. Le point initial s'est plutôt détendu en gonflant et en maintenant sa constitution intacte. On parle alors de détente adiabatique. De fait, l'espace-temps gonfle continuelle à la vitesse de la constante Hubble qui varie avec la gravité régnante. Pendant les phases d'importante gravité, cette expansion a connu des décélérations. En présence de faible gravité, cette expansion connait de plus en plus d'accélération. Cette vitesse d'expansion est de 67 km/mégaparsec/s. Tout cela étant, nous sommes arrivés à la conclusion que l'entropie de l'univers décroît et que son taux d'organisation augmente. C'est une affirmation très subtile, car si on observe l'univers sans prendre du recul, on a l'impression que le désordre augmente. C'est ce que la version de la formule de Boltzmann *log(w). Kb,* qui calcule le nombre de configurations possibles d'un système, laisse croire. Mais, si nous prenons la version originale de Max Planck, $S= log(w). Kb+S_0$ *(0K),* les choses deviennent plus claires. L'univers formerait une seule configuration à l'approche de l'infini en matière de froid, à savoir à l'approche du zéro absolu. Toutes ses configurations actuelles, qui sont issues d'un mouvement de détente adiabatique, se figeraient comme les électrons se figent dans un supraconducteur aux températures proches du zéro absolu, formant une configuration unique sans que ces électrons soient d'abord ramenés vers un point unique. Tout se fige, même les vides entre les électrons (ces vides ne sont pas si vides mais tributaires de la nature ondulatoire des électrons) pour former une seule configuration opaque malgré les positions occupées par ces électrons dans le système, comme nous le montre le modèle BCS. Nous aurions voulu que Boltzmann assiste à cette expérience inédite d'Heike Kamerlingh Onnes de supraconductivité où les milliards de milliards de configurations se figent en une seule configuration strictement ordonnée. Le désordre de l'univers est donc apparent. Ses blocs de matières se sont éloignés les uns des autres sous la poussée de l'énergie noire sans que lui-même soit en désordre. Mais, tous ces blocs de particules tendent à former une configuration unique au zéro absolu d'entropie zéro.

La formule de Max Planck nous indique donc le chemin malgré les résultats exponentiels que nous pourrions obtenir dans les calculs de l'ensemble des micro-états de l'univers. Peut-être que ces chiffres exponentiels auraient découragé certains physiciens qui ont cru à être parvenus à des résultats insensés. Mais, l'autre bras de la formule retranché par Boltzmann, figurant chez Max Planck lui-même, indique la direction de l'entropie même quand les configurations seraient apparemment exponentielles.

Le nouveau message de l'entropie générale est réécrit à partir du troisième principe et non plus à partir du deuxième principe de thermodynamique, comme beaucoup de thermodynamiciens le font. Le zéro absolu nous indique le vrai *big chill* vers lequel l'univers évolue. Notre univers est déjà très froid, mais tend toujours vers le grand froid, par excellence. Cela étant, il faut interpréter l'entropie en fonction des autres paramètres. On ne peut pas isoler l'entropie des autres variables extensives et intensives qui permettent de la dériver. La température permet de dériver l'entropie et vice versa. Selon les principes thermodynamiques, une entropie peut ne pas croitre dans ces conditions de température de plus en plus très froide. C'est une violation du deuxième et du troisième principe, et donc de toute la thermodynamique. Les physiciens n'ont donc pas écouté la nature. Il faut écouter la nature elle-même puisqu'elle a un langage. Ilya Prigogine propose que le physicien établisse un dialogue avec la nature qui ne soit pas un dialogue expérimental uniquement, car la nature est capricieuse et sait se cacher lorsqu'elle est agressée par un arsenal d'instruments. Il propose, en revanche, de considérer les propriétés intrinsèques de la matière sans estimer que ce sont des erreurs ou la limite de notre intelligence quand elles semblent ne pas s'accorder à nos prévisions. Car, généralement, lorsque le comportement de la nature ne s'accorde pas avec nos lois, nous pensons que ce sont des erreurs d'observation. Il faut donc dégager les lois après avoir écouté et dialogué respectueusement avec la nature, et non pas d'imposer à la nature ce que nous pensons d'elle. Le dialogue respectueux avec la nature permet donc de la comprendre, de l'écouter car, elle nous parle. La température sans cesse décroissante nous indique une entropie décroissante. Mais parfois, l'obstination et le fait que nous voulons lui coller des principes issus de notre propre crue fait que nous nous enlisions dans l'erreur.

BIBLIOGRAPHIE

➢ OUVRAGES

1. Aristote, *Métaphysique*, traduction d'Alexis Pierron et Charles Zevort, Joubert-Librairie-Editeur, 1840, livre A, II, 982b

2. Bachelard Gaston, La *formation de l'esprit scientifique. Contribution à une psychanalyse de la connaissance objective (1934)*, version numérique par Jean-Marie Tremblay, Québec, 2015

3. Bacon Francis, *Nouvel organum ou règles véritables pour l'interprétation de la nature*, traduction et notes de Malherbe et J-M. Pousseur, PUF, Paris, 1986

4. Bergson Henri, *L'évolution créatrice* (1907), Édition électronique (ePub, PDF) v. : 1,0 : Les Échos du Maquis, avril 2013

5. Bernard d'Espagnat, *Le réel voilé. Analyse des concepts quantiques*. Fayard, Paris, 1994

6. Brunet Eric, Hocquet Thierry, Leyronas Xavier, Cours de thermodynamique, Sorbonne, 2019

7. Chalmers Alan F, *Qu'est-ce que la science ? Récents développements en philosophie des sciences : Popper, Kuhn, Lakatos, Feyerabend*, Éditions La Découverte, Paris, 1988

8. De Rosnay Joël, *Les origines de la vie, de l'atome à la cellule*, Seuil, Paris, 1966

9. Descartes René, *Discours de la méthode. Pour bien conduire sa Raison et rechercher la vérité dans les sciences*. (1637), édition électronique ePub) : Les échos du Maquis, 2011.

10. Dudgale J.S, Entropy and its physical meaning, Taylor and Francis publishers, university of Leeds, 1789

11. Ferry Luc, *Apprendre à vivre*, Edition Plon, 2006

12. FOE Jospin Brice, De la dynamique classique à la thermodynamique des processus de non-équilibre : une ontologie de la nature à partir de la physique, chez Ilya Prigogine (mémoire), Université de Yaoundé 1, inédit, 2020

13. FOE Jospin Brice, Enseignement et apprentissage par les supports didactiques et les dispositifs mnémotechniques, et augmentation des performances : cas de la philosophie, mémoire, Université de Yaoundé1, inédit, p.17

14. Grenet Paul-Bernard, *Histoire de la philosophie antique*, Beauchesne et ses Fils, Paris, 1960

15. Johnson Eric, *Anxiety and the Equation. Understanding Boltzmann's entropy*. The MIT Press, Massachusetts, 2018

16. Kant Emmanuel, *Critique de la raison pure*, tr. fr. Barni et Archambault, Paris, Flammarion, 1900

17. Laplace Pierre-Simon, *Essai philosophique sur les probabilités*, 6eme édition, Bachelier, Paris, 1840,

18. Letort Maurice (du Centre International de synthèse), *La chimie physique. Acquisitions récentes et tendances actuelles en physique et chimie*, Aubier-Montaigne, Paris, 1968

19. Lucrèce, De *la nature des choses*, livre II, traduction Alfred Ernout, éditions les Belles lettres, Paris, 2012, p. 216.

20. Mathilde Blaise, *Reconsidération du moteur de Carnot : de la faisabilité thermodynamique à la faisabilité technique. Génie des procédés*, Université Lorraine, Nancy, 2013, p 6, in htttps:// hal.univ-lorraine.fr/ hal-01862170

21. Marquet Pascal, The third law of thermodynamics or an absolute definition for Entropy. Part 1 : the origin and application in thermodynamics. Météo-France, CRMM/GMAP, Toulouse, 2019

22. Monod Jacques, *Hasard et nécessité. Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*, éditions du Seuil, Paris, 1970

23. Nkwame Nkrumah. *Le Conciencisme*. Éditions Présence Africaine, Paris, 1976

24. Nicolis Grégoris et Prigogine Ilya, *A la rencontre du complexe*, PUF, Paris, 1989

25. Poincaré Henri, *Science et méthode*, (1908), livre II, consulté en ligne dans wikisource.

26. Popper Karl (1985), *Conjectures et réfutations. La croissance du savoir scientifique,* Payot., 1985

27. Prigogine Ilya, *Entre le temps et l'éternité,* Flammarion, Paris, 1992

28. Prigogine Ilya, *La fin des certitudes*, Odile Jacob, Paris, 2001

29. Prigogine Ilya et Stengers Isabelle, La Nouvelle Alliance Métamorphose de la science, Paris, Gallimard, 1979

30. Prigogine Ilya and Stengers Isabelle, Order out of chaos, Man's new dialogue with nature, A Bantam Book, 1984

31. Pullicino Michel, *Thermodynamique. Tout le cours*. Bibliothèques électroniques des classes préparatoires in http://prepa-book.forummaroc.net

32. Tring Xuan Thuang, *Le chaos et l'harmonie, la fabrication du réel,* Gallimard, Paris, 2000

33. Shavit Arthur and Gutfinder Chaim, *Thermodynamics. From concepts to applications*, CRC Press Taylor and Francis group, 2008

34. Starzak Michael E, *Energy and Entropy. Equilibrium to Stationary States*, Springer, New York, 2010.

35. Stonier Tom., *Information and the Internal Structure of the Universe*. New York: Springer-Verlag, 1990

36. Rodriguez Quentin, *Thermodynamique et auto-organisation dans les sciences physiques Étude de la genèse du concept d'auto-organisation chez Ilya Prigogine (1945-1975)*, (mémoire de recherche), Université Paris-VII Diderot, 2016

37. Rosenfeld Léon, *Théories de la causalité*, PUF, Paris, 1991

38. Taous Belaid, Cours et exercices de thermodynamique, Université de A. MIRA-BEJAIA, Faculté de technologie, Département de technologie, année universitaire 2019-2020, in https://elearning.univ-bejaia.dz, p. 9.

39. *Thermodynamique*, Lycée F. Buisson PTSI, le 2e principe

40. Uvarov Eugene Boris, *Dictionnary of sciences*, (revised with assistance of Dr. Chapman B.A), The Whitefriars Press, London and Tombridge, 1994

41. Saugaut Pierre, *Introduction à la pensée scientifique moderne*, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Université Pierre et Marie Curie – Paris 6, pierre.sagaut@upmc.frhttp://www.lmm.jussieu.fr/~sagaut

42. Schrödinger Erwin, *What is life? The Physical Aspect of the Living Cell,* (first printing 1944), Cambridge University Press edition, 1967

43. Wittgenstein Ludwig, *Tractatus logico-philosophicus*, traduction française de Gilles Gaston Granger, Gallimard, Paris, 1993

➢ **ARTICLES**

1. Abada A, G. Abramovici G, Raimbault J-L et Roux G, *Cours de Physique statistique*, Parcours Physique et Applications & Mécanique, *Licence de Physique* 3`eme année, Université Paris Saclay Orsay, année académique 2015-2016

2. Bailly Francis et Longo Giuseppe, *Organisation biologique et entropie negative : A partir des réflexions de Schrödinger,* Partie II du texte présenté en anglais à la Conférence : "From Type Theory to Morphological Complexity: A Colloquium in Honor of Giuseppe Longo", Paris, June 28-29, 2007

3. Balibrea Francis, *On Clausius, Boltzmann and Shannon Notions of entropy* in *Journal of modern physics,* No 219-227, January, 2016.

4. Bartlett Stuart John et Wong Michael L, *« Defining Lyfe in the Universe: From Three Privileged Functions to Four Pillars »,* Life, vol. 10, no 4, 16 avril 2020

5. Bernard d'Espagnat, *A la recherche du réel* in *Journal de Physique Colloques,* Université de Paris Sud, Paris, 1981, 42 (C2), pp.C2-99-C2-113.

6. Blanquet Marie-France, *Francis Bacon (1561-1626), baron de Verulam, 1er vicomte de St Albans,* mis en ligne le 20 décembre 2009 in https://www.reseau-canope.fr/savoirscdi/societe-de-linformation/le-monde-du-livre-et-de-la-presse/histoire-du-livre-et-de-la-documentation/biographies/francis-bacon-1561-1626-baron-de-verulam-1er-vicomte-de-st-albans.html#contenu

7. Chang, T., et al. (2014) On the Arrow of Time. Journal of Modern Physics, 5, Scientific research Publishing, Department of Nuclear science and Technology, Fudan University Shangai, Febraury 2014. P 587-590Connor Nick, « *Qu'est-ce que le zéro absolu ? - Température - Définition »* in *thermal-ingenieering/org/fr/* posté le 22 mai 2019.

8. Comparat Daniel, Chotia Amodsen, Viteau Mathieu, Vogt Thibaut et Pïllet Pierre, *Aux frontières des plasmas : les plasmas ultra-froids,* Laboratoire Aimé Cotton, CNRS, Université Paris-Sud.

9. Deluzarche Celine, *« Cet astéroïde qui a rebondi sur l'atmosphère terrestre fonce sur Jupiter »*, posté dans futura-science le 07/04/2020 consulté dans www.futura-sciences.com

10. Douat Claire, Thierry Dufour, João Santos Sousa, *Les plasmas froids et le Vivant, de nouvelles Avancées*, Reflets de la Physique, 2023, 75

11. Douillet Claudine, Interview de Marie Curie, *Actualité antisémitisme / racisme, Culture, femmes de parole,* in Magazine, le12 aout 2018 en ligne sur www1.alliancefr.com

12. Doumenc Fréderic, *éléments de thermodynamique et thermique, Thermodynamique I*, Université Pierre et Marie Curie, Licence de Mécanique - L2, Année 2008/2009

13. Garcia-Sandoval J.P, Hudon N, Dochain, Denis, Conservative and dissipative phenomena in thermodynamical systems stability in IFAC-PapersOnline, vol 49, 2016

14. Gödel Kurt, sur les propositions formellement indécidables des Principia mathematica et des systèmes apparentés, consulté dans https://fr.wikipedia.org/

15. Goetschel Laurent et Péclard Didier, *« Les conflits liés aux ressources naturelles. Résultats de recherches et perspectives »*, Annuaire suisse de politique de développement, 25-2 | 2006, 95-106.

16. Grain Julien, *« L'expansion de l'univers : l'impossible mesure »* in https//radiofrance.fr>podcasts

17. Fouquet sylvain, Hammer François, *Les principes cosmologiques paru dans UFE l'observatoire de Paris* **in** https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_cosmologie/impression.html

18. Hegyi Gabriella, Vincze Gyula, Szasz Andras, *On the Dynamic Equilibrium in Homeostasis*, in Open Journal of Biophysics, 2012, 2, 64-71

19. Hugon Philippe, *Le rôle des ressources naturelles dans les conflits armés africains*, dans « Hérodote », 2009/3 (n° 134)

20. *Isa Schwami and Dumas Christoph, Entropy and Negentropy Principles in the I-Theory.Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology, 2020, 6, 259-273*

21. Jolivet Régis, *Traité de philosophie, introduction générale logique cosmologie*, 4e édition, Emmanuel Vitte éditeur, 1939.

22. Koppe Martin, *Les plasmas froids réchauffe l'innovation,* publié le 04/03/2016 in *https://lejournal.cnrs.fr/articles/les-plasmas-froids-rechauffent-linnovation*

23. Klein Etienne, *What does the arrow of time stand for?*in Natural science, Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière (larsim) centre d'études de Saclay 91191gif sur Yvette cedex, France ; Vol2, n^0 3, 212-219

24. Kubo R., *Thermodynamics*, North-Holland Publishing company, 1968

25. Landau Lev Davidovic, Lifsic Evgeni Mihailovic et Medvedev Sergeî (traduction de S. Medvedev), *Physique statistique*, Moscou/Paris, Mir Ellipses, coll. « Physique théorique », 1994, 4ed

26. (La rédaction), L'énergie *solaire est-elle encore sous-exploitée ?* in Meilleurtaux, mis à jour le 14 septembre 2020, in https://energie.meilleurtaux.com/actualites-energie/2020-septembre/energie-solaire-est-elle-encore-sous-exploitee.html

27. Matisse Georges, *A la source des phénomènes vitaux. Vers une bio-thermodynamique*, Paris Hermann & C^{ie} éditeurs, 1954

28. Mitrovic Jovan, *Irreversible Thermodynamics of James Watt*, in Advances in Historical Studies/Scientific research publishing, Stuttgart, 2022

29. Jovan Mitrovic, *Sadi Carnot and the Thermodynamics of James Watt*, in *Advances in Historical Studies*, Scientific research publishing, Stuttgart, 2023, 12, 47-62

30. Morin Edgard, *« La stratégie de reliance pour l'intelligence de la complexité* » in *Revue internationale de systémique*, AFCET système, Paris, vol 9, n^{o}2, 1995.

31. Nagels Maxime, Anakkar Abdelkader, Abdelhakim Guelzim Abdelkader, *Le concept de système thermodynamique*, Université de Lilles, Faculté des sciences et technologie, Département de physique in https://www.j3ea.org

32. Ilya Prigogine et René Lefever, « Stability and Self-Organization in Open Systems », in *Advances in Chemical Physics*, vol. 29:*Membranes, Dissipative Structures and Evolution*

33. O'Connor et Wong Hong Yu, « Emergent Properties », dans The Stanford Encyclopedia of Philosophy, 2012

34. Otsuka Jinya, *The Negative Entropy in Organisms; Its Maintenance and Extension* in Journal of Modern Physics, 9, 2156-2169, 2018

35. Ouargli-Saker Rachida, *Cours de thermodynamique*, Université des Sciences et de la Technologie D'Oran « Mohamed BOUDIAF » Faculté de Chimie Département de Génie des Matériaux, in www.univ.usto.dz

36. Rominandreau, *Discussion : Expansion de l'Univers* du 27 janvier 2009 in Wikipédia

37. Rossi Ernest, *Qu'est-ce que la vie ? L'évolution de l'information du flux quantique au Soi,* Perspectives psychologiques, n^0 26, p 6-22, 1992.

38. Rousseau Pierre, *Histoire de la science*, Librairie Arthème Fayard, Paris, 1954.

39. Sacco Laurent, *L'entropie de l'univers-son désordre-revue à la hausse* consultée dans *www.futura.sciences.com/sciences/actualité/astronomie*

40. Salem Jean, *Démocrite, Epicure, Lucrèce : philosophes des atomes et pensée du plaisir*. (Conférence no 4.) in https://lycee-henri4.com

41. Simard Jean-Claude, *culture scientifique, épistémologie et pédagogie* in pédagogie collégiale, Vol 16, no 3, mars 2003

42. Satltiel Edith, « *Le principe de conservation de l'énergie et le théorème de l'énergie mécanique en classe de première* » in *Bulletin de l'Union des physiciens*, Paris VII, numéro 794

43. Stanley M.etUrey Harold Clayton, *« A Production of Amino Acids Under Primitive Earth Conditions »,* in *Science, Vol 117, n^o 3046 1953, pp 528-529.*

44. Taran Olga. et Von Kiedrowski Günter, *Autocatalysi*s. In: Gargaud et al, Encyclopedia of astrobiology, Springer, Berlin, pp 128-129.

45. ThébaultLudovic, *L'univers, l'espace et la matière*, inhttps://www.botanic06.com/site/evol.htm

46. Veneziano Gabriel, *L'univers avant le Big Bang* in https://www.pourlascience.fr/sd/cosmologie/l-univers-avant-le big-bang-2971 .php

47. Verdo Yann, Que 'est-il produit à l'instant zéro ? in https://www. lesechos.fr/2013/08, publié le 05 aout 2013 mis à jour le 06 2019

48. Yi-Fang Chang, *Entropy decrease in isolated systems: theory, facts and test, in International Journals of Fundamental Physical Science (IJFPS) Vol 10, N^0 2*, p. 1—24

49. Zin Jean, *De l'entropie à l'écologie*, mis en ligne le 22 février 2011, https://jeanzin.fr/2011/02/22/de-l-entropie-a-l-ecologie/

➢ DOCUMENTS

1. Actes du Congrès de Solvay in Robert Paris, *Pourquoi Einstein affirmait que « dieu ne joue pas au dé »* ? *extrait du site https:// wwwmatiereevolution.fr du 19 février 2017.*

2. ARB (l'Agence régionale de la biodiversité en Île-de- France) (Département biodiversité de l'Institut Paris Region), *Économie et biodiversité : produire et consommer dans les limites de la biosphère (2015)*, mis en ligne le 12 mai 2015 inhttps://www.arb-idf.fr/nos-travaux/publications/economie-et-biodiversite-produire-et-consommer-dans-les-limites-de-la-biosphere-2015/

3. IER, *Plasmas : la matière dans un drôle d'état* in https://www.iter.org/fr/mag/13

4. CEA, *La supraconductivité et ses applications* in https://www.cea.fr/comprendre/Pages/matiere-univers/essentiel-sur-supraconductivite-et-applications.aspx

5. *La constante de Hubble -L'Astronomie Afrique* in https://lastronomieafrique.com/la-constante-de-hubble/

6. *Conservation de l'énergie mécanique* in http:// resssources.unisciel.fr

7. *Découverte et historique de la supraconductivité* in https://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/physique-supraconductivite-103/page/2/, consulté le 12 juin 2024

8. *Document sur la température de l'univers* tiré du site https://fr.wikipedia.org/wiki/Temperature_de_l'Univers, consulté le 12 mai 2024

9. *Document sur L'origine de l'univers* tiré du site https://www.cnrs.frcw/dossiers/dosbig/decouv/xchrono/origine/niv1_1.htm, consulté le 09 avril 2024

10. *Document sur les éconosphère* tiré site https://www.cncd.be/+-Econospheres, consulté le 06 mai 2024

11. *Document sur la préservation de la couche d'ozone* tiré du site : https://www.un.org/fr/climatechange/preserving-the-ozone-layer, consulté le 10 mai 2024

12. *Document sur les forces conservatives* tiré du site https://fr.wikipedia.org/wiki/Force_conservative, consulté le 11 avril 2024.

13. *Document sur les plasmas* tiré du site https://www.bph-plasma.eu/fr/bph_plasma/plasma_therapy/index.html, consulté le 08 mai 2024.

14. *Document sur le lamarkisme* tiré du site https://fr.wikipedia.org/wiki/Lamarckisme, consulté le 05 mai 2024.

15. *Document sur le big Crunch* tiré du site https://fr.wikipedia.org/wiki/Big_Crunch, consulté le 10 mai 2024.

16. *Document sur la température de l'univers* tiré de site , consulté le 12 mai 2025https://fr.wikipedia.org/wiki/Temperature_de_l'Univers, consulté le 07 mars 2024.

17. *Document sur la biosphère tiré du site https:// fr.wikipedia.org/wiki/Biosphère,* consulté le 03 mai 2024.

18. *Document sur la t-hermodynamique tiré du site La thermodynamique* in fr.m.wikiopedia.org.wiki/Thermodynamique, consulté le 11 avril 2024.

19. Hôpital Universitaire International Khalifa, *Comment le corps se fournit-il en énergie durant la période de jeûne ?* in https://www.hck.ma/fr/info-sante/comment-le-corps-se-fournit-il-en-energie-durant-l/ ?, consulté le 12 mai 2025

20. *Institut National du Cancer*, https://www.e-cancer.fr/Dictionnaire/C/cancer, consulté le 12 juin 2024.

21. La rédaction Meilleurtaux, *L'énergie solaire est-elle encore sous-exploitée ?* Mis à jour le 14 septembre 2020**,** in https://energie.meilleurtaux.com/actualites-energie/2020-septembre/energie-solaire-est-elle-encore-sous-exploitee.html, consulté le 12 mai 2025.

22. NASA, *« What is the interstellar Medium.* » in *The interstellar Medium*, an online tutorial, Université of Hampshire Experimental Space Plasma Group, consulté le 15 mai 2024.

23. Plasma : la matière dans un drôle d'état publié le 12/06/2020 et mis à jour le 06/09/2022 in *https://www.iter.org/fr/mag/13/51#,* consulté le 21 mai 2024.

24. Le plasma, état de la matière très abondant dans l'univers in *https : //www.curieusehistoires.net/le-plasma-un-etat-de-la-matiere-tres-abondant-dans-lunivers/,* consulté le 12 mai 2024.

25. Le vide galactique, ce néant mystérieux et omniprésent dans l'univers in https : // dailygeekshow.com, consulté le 22 mai 2024.

26. Qu’est-ce que l’horizon des événements ? in https://www.futura-sciences.com/sciences /definitions/physique-horizon- évènements-4193/, consulté le 12 mai 2025.

➢ WEBOGRAPHIE

1. www.allopropf.qc.ca.chimie wikipédia.org/wiki/E du 21 août 2023
2. Systèmes isolé in https:// fr.m.wikipedia.org
3. https://lepetitastronaute.fr/blog/lendroit-le-plus-chaud-et-le-plus-froid-de-lunivcers/
4. https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/univers-big-bang-858/
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Big_Bang
6. https://www.ef4.be/fr/thermique/introduction.html
7. https://fr.linkedin.com/pulse/afrique-un-potentiel-energie--solaire-sous-exploité-ofty
8. https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/introduction-a-lhomeostasie-et-a-la-regulation
9. https ://www. techno-science.net
10. *https://fr.wikipedia.org/wiki/Dessein_intelligent*

➢ MANUELS

1. Delaunay Alain, Universalis.fr/encyclopédie
2. Stengers Isabelle in Universalis : rubrique consacrée à Prigogine

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE iii
DEDICACE ..... **iii**
REMERCIEMENTS ..... **iv**
GLOSSAIRE……..……..……**v**
LISTE DES FIGURES ..... **vii**
RÉSUMÉ ..... **ix**
ABTRACT ..... **x**
INTRODUCTION GENERALE **1**
PREMIERE PARTIE :LA THERMODYNAMIQUE MODERNE UNE CRITIQUE DE LA VISION CLASSIQUE DE L'ENTROPIE. **13**
INTRODUCTION PARTIELLE 14
CHAPITRE 1 : CRITIQUE D'UNE VISION CLASSIQUE DE L'ENTROPIE **16**
1.1. Constats à l'échelle macroscopique 16
1.1.1. Des structures macroscopiques hautement organisées 16
1.1.2. Des structures homéostatiques 20
1.1.3. De la dichotomie ordre/désordre : une bidirectionnalité de l'entropie ? 24
1.2. Analyse des comportements moléculaires 29
1.2.1. Du chaos à l'émergence de l'ordre 29
1.2.2. De la proximité et de l'éloignement de l'équilibre : apories d'une entropie maximale 34
1.2.3. Des dissipations et de la non-conservation des énergies et leurs implications 40
CHAPITRE 2 : LA PRODUCTION D'ENTROPIE DANS LES SYSTEMES ISOLÉS **48**
2.1. Systèmes isolés : charme et fascination 48
2.1.1. Du 2e principe : énoncé et sens de la diffusion thermique 48
2.1.2. Du principe d'irréversibilité et apories d'une antithermodynamique : 55
2.1.3. De la mort thermique 62

2.2. Phénomènes troubles des systèmes isolés 65
2.2.1. Le troisième principe de thermodynamique 65
2.2.2. Des forces mécaniques et des fluctuations à la réduction entropique 69
2.2.3. Le nouveau message de l'entropie 74
CHAPITRE 3 : AU-DELÀ DES SYSTÈMES ISOLÉS 79
3.1. Des systèmes ouverts et fermés 79
3.1.1. Des dissipations à l'entropie décroissante 79
3.1.2. Enthalpie et entropie : rapports et implications thermodynamiques 88
3.1.3. Systèmes ouverts et généralisation 91
3.2. Des systèmes vivants 95
3.2.1. De la physique à la biologie : nécessité d'une bio-thermodynamique 95
3.2.2. De la physique à la chimie : nécessité d'un modèle physico-chimique 101
3.2.3. Néguentropie : paradoxe entropique ou nouvelle catégorie à part ? 105
CONCLUSION PARTIELLE 110
DEUXIÈME PARTIE : APORIES DE L'APPROCHE CHAPITRE 4 : DIFFICULTÉS THÉORIQUES DE LA FORMULATION D'UNE ENTROPIE UNIVERSELLE CROISSANTE D'UNE ENTROPIE DECROISSANTE 112
INTRODUCTION PARTIELLE 113
CHAPITRE 4 : DIFFICULTÉS THÉORIQUES DE LA FORMULATION D'UNE ENTROPIE UNIVERSELLE CROISSANTE 114
4.1. L'univers comme un système thermodynamique singulier ? 115
4.1.1. De l'équation de production de la matière par l'espace-temps : impact sur la production d'entropie 115
4.1.2. Des problèmes observés dans la maîtrise des variables extensives et intensives dans le modèle standard : l'univers un système isolé aux frontières ouvertes ? 121
4.1.3. Problème des phases et transitions de phases : regard sur les plasmas et leur entropie . 126
4.2. Mystères et énigmes 131
4.2.1. L'énergie noire et matière noire : la physique au défi ? 131
4.2.2. Des apories entropiques d'un système thermodynamique atypique entre système isolé et système ouvert : la porte étroite. 135
4.2.3. Entre théorie cosmologique et un principe anthropique : la ligne de crête 139
CHAPITRE 5 : OBSTACLES MÉTHODOLOGIQUES DE LA VÉRIFICATION D'UNE ENTROPIE GÉNÉRALE 148
5.1. De la dissymétrie entre énoncés théoriques et énoncés d'observation 148

5.1.1. De l'aporie de l'élaboration des énoncés universels aux obstacles d'une théorie du « tout ». 148

5.1.2. Le mythe de l'universel : ruses méthodologiques et risques d'une induction amplifiante 153

5.1. 3. Thermodynamique universelle : entre une théorie incomplète, un errement de l'esprit ou une mégalomanie épistémique ? 158

5.2. Mesures et démesures 162

5.2.1. Les difficultés d'accès aux données initiales : et le problème de l'infranchissable *mur de Planck* et *l'amplitude de probabilité* des valeurs entropiques initiales 162

5.2.2. Expansion de l'univers : les problèmes de mesures d'un état entropique final 169

5.2.3. Du macro-état aux micro-états de l'univers : quelle lecture entropique ? 174

CHAPITRE 6 : LES SITUATIONS FLOUES DU MODÈLE STANDARD . 180

6. 1. Equations, formules et axiomes querellés 180

6.1.1. Du *théorème à 3 corps* au paradoxe d'un univers non chaotique *à n corps* et le rôle des relativités galiléennes et einsteiniennes 180

6.1.2. *Théorème H* de Boltzmann et paradoxe d'un univers qui a gardé sa mémoire 186

6.1.3. Paradoxes d'univers extrêmement froid à entropie croissante : violation du 3e principe ou mauvaise saisie du problème ? 191

6.2. Quelques autres principes en débats 195

6.2.1. Le grand thermostat universel face à la grande chaleur des étoiles : ensembles grand-canoniques et comportement entropique 195

6.2.2. Le principe cosmologique d'isotropie face à la dissymétrie de la matière et les implications entropiques 201

6.2.3. Le débat sur une *éventuelle énergie potentielle* de l'univers. 205

CONCLUSION PARTIELLE 210

TROISIÈME PARTIE DE LA RUPTURE EPISTEMOLOGIQUE À LA CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PARADIGME ENTROPIQUE..... 211

INTRODUCTION PARTIELLE 212

CHAPITRE 7 : LA DÉCROISSANCE RETROUVÉE OU RÉECRITURE DU NOUVEAU MODÈLE. 213

7.1. Deuxième principe et réécriture des entropies locales 213

7.1.1. De la croissance entropique et de la mort thermique 213

7.1.2. Décroissance entropique et production d'entropie minimale dans les systèmes locaux .. 217

7.1.3. La croissance entropique dans les systèmes mécanisés et ingénieuriaux et l'échec du projet de Carnot : James Watt, vainqueur de Carnot ? 222

7.2. Troisième principe et réécriture de l'entropie générale 227

7.2.1. Echec du deuxième principe sur le système thermodynamique géant 227

7.2.2. De la proposition d'une reformulation de l'entropie de l'univers à partir du troisième principe de thermodynamique : et la méprise de Max Planck par Boltzmann 230

7.2.3. Conséquences : Réinterpréter le *big chill* à la lumière du troisième principe..... 235

CHAPITRE 8 : ENJEUX PRATIQUES ET INTÉRETS HUMANITAIRES DES QUESTIONS LIÉES À L'ENTROPIE. 240

8. 1. Produire des systèmes néguentropiques naturels et artificiels 241

8.1.1. Thermodynamique et écologie : renforcer et remédier à l'équilibre homéostatique de la planète..... 241

8.1.2. Thermodynamique du corps humain : de la nature extérieure à la nature intérieure... 247

8.1.3. De « la soutenabilité écologique »: enjeux d'un rapport équilibré entre biosphère, écosphère et éconosphère 251

8.2. Des perspectives et orientations pour une capitalisation des acquis en thermodynamique .. 256

8.2.1. Pollution et transition énergétique pour une exploitation optimale de l'énergie solaire. 256

8.2.2. Technologie au plasma : De la Biomédecine au plasma froid et des sources d'énergie au plasma chaud 260

CHAPITRE 9 : COMPRENDRE LA VIE À PARTIR DE LA PHYSIQUE … 269

9.1. Entre mécanisme et vitalisme 269

9.1.1. De la physique à la biophysiologique : insuffisance explicative de la vie par l'entropique négative..... 269

9.1.2. D'un simple mécanisme physique à mécanisme intelligent : la violation de l'inégalité de Clausius par la biothermodynamique..... 274

9.1.3. Thermodynamique du vivant : l'anthropie vainqueur de l'entropie ? 280

9.2. Des principes d'immanence ou transcendance de la vie, à partir de l'étude des systèmes thermodynamiques..... 285

9.2.1. La limite d'une intelligibilité du vivant à partir du raffinement des lois de la physique 285

9.2.2. Le triomphe des processus vitaux sur les lois physiques : du *désenchantement* au *réenchantement* des lois physiques. 290

9.2.3. La porte ou récit d'une approche émergente. Autrement la vie de la *life* à la *lyfe* 294

CONCLUSION PARTIELLE 300

CONCLUSION GENERALE 301

BIBLIOGRAPHIE 305