

**CINQ LOIS ARTISTIQUES RELATIVISTES. DU CONCEPT
D'ESPACE-TEMPS EN ASTROPHYSIQUE À L'INVENTION SONORE ET
VISUELLE**
**3ICAR /ICAREDITIONS - INTERNATIONAL INSTITUTE FOR INNOVATION,
ARTISTIC CREATION AND RESEARCH**

JÉRÔME PÉTRI / STÉPHANE DE GÉRANDO

RÉSUMÉ. D'Aristote à Einstein, nous rappelons des étapes importantes qui participent à l'évolution de la notion d'espace et de temps. Puis par analogie et suivant un vocabulaire adapté, nous définissons cinq lois artistiques relativistes propre à enrichir l'invention et la réalisation d'une œuvre contemporaine sonore et /ou visuelle.

MOTS CLÉS. Espace, temps, théorie de la relativité, création contemporaine, objet et espace concrets et abstraits, vitesse, longueur, masse, simultanéité.

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction historique aux concepts d'espace et de temps	2
1.1. Aristote	2
1.2. Galilée	2
1.3. Relativité restreinte	3
1.4. Gravitation	4
1.5. Relativité générale	5
2. Remarques musicologiques et approche générale	5
2.1. L'écriture de l'espace et du temps en musique	5
2.2. Approche générale	6
3. Analogies artistiques et premiers vocabulaires	7
3.1. Objet concret ou abstrait	7
3.2. Espace concret ou abstrait	7
3.3. Temps et espace perçus, vitesse, distance, masse - énergie	8
4. Cinq lois artistiques relativistes et exemples d'application	9
4.1. Première loi : relation entre vitesse et temps	9
4.2. Seconde loi : relation entre vitesse et longueur des objets	10
4.3. Troisième loi : relation entre masse et temps	10
4.4. Quatrième loi artistique : relation entre masse et espace	11
4.5. Cinquième loi : relativité de la simultanéité	11
5. Espace-temps ou objet quadridimensionnel	13
5.1. Remarques scientifiques	13
5.2. Exemples d'application	13
6. Synthèse des cinq lois artistiques relativistes	13
6.1. Définitions initiales	13
6.2. Lois	13

Jérôme Pétri est astrophysicien, enseignant-chercheur à l'Observatoire Astronomique de Strasbourg, Docteur Habilité à Diriger les Recherches, Stéphane de Gérando est compositeur, professeur de composition et nouvelles technologies (CM19 Paris), Docteur Habilité à Diriger les Recherches, ancien directeur de département universitaire et directeur pédagogique de centre de formation supérieure des enseignants. Pour citer cet article : Pétri Jérôme, de Gérando Stéphane, *Cinq lois artistiques relativistes. Du concept d'espace-temps en astrophysique à l'invention sonore et visuelle*, 3icar /icarEditions, 2015. Distribution électronique © 3icar /icarEditions (3icar.com). Tous droits réservés pour tous pays.

7. Premier bilan	14
Références	14
Annexe A. Notions scientifiques complémentaires et vocabulaire de base	14

1. INTRODUCTION HISTORIQUE AUX CONCEPTS D'ESPACE ET DE TEMPS

Notre appréhension actuelle de l'espace et du temps comme une entité mêlant la notion de distance (spatiale) et de durée (temporelle), a priori des grandeurs physiques indépendantes, en un concept unique d'espace-temps tel que résumé par la théorie de la gravitation d'Einstein repose sur un long cheminement guidé par de simples expériences de mécanique classique.

1.1. **Aristote.** Pour les anciens, selon la philosophie d'Aristote, au IV^eme siècle avant J.-C., l'espace et le temps sont deux notions bien distinctes et possèdent chacune un caractère absolu, invariant par translation suivant toute direction spatiale ou suivant la direction temporelle. Le postulat d'un espace absolu signifie que tout corps matériel se déplace dans une trame de fond, un milieu immuable présent à tout instant dans tout l'univers. Le temps absolu s'écoule de manière régulière et invariable, indépendamment des phénomènes physiques qui se déroulent dans l'espace absolu. Il n'y a aucune interaction entre cette conception de l'espace et du temps et celles des phénomènes physiques s'y déroulant. L'état naturel de tout objet est l'état de repos par rapport à cet espace absolu. Dans cette approche, il existe un système de référence privilégié associé à cet espace absolu. Autrement dit, un observateur sera en mesure de déterminer son état de mouvement par rapport à ce milieu absolu en réalisant des expériences de mécanique classique. L'espace et le temps n'interagissent pas entre eux et sont découplés de leur contenu matériel.

1.2. **Galilée.** Or cette vision est en contradiction avec les constatations faites par Galilée, bien plus tardivement, au XVII^eme siècle, sur la nature du mouvement d'un objet. En effet, selon le principe de relativité galiléenne, il est impossible de distinguer entre un objet à l'état de repos tel que défini plus haut, et ce même objet en mouvement rectiligne et uniforme par rapport à l'espace absolu. Pour le voir, considérons deux observateurs à l'époque de Galilée, l'un accroché sur le mât d'un bateau se mouvant à vitesse constante et uniforme (on suppose une mer calme et on néglige les phénomènes de courbure de la surface terrestre à grandes échelles) et l'autre perché sur une tour au bord du rivage. Chacun possède un boulet de canon qu'il laisse tomber en chute libre jusqu'au sol. À quel endroit du plancher tomberont ces boulets ? Galilée remarqua que chaque observateur signalera un mouvement de chute libre vertical et que le boulet heurtera le sol à la verticale du point de départ. Noter au passage que la direction verticale est la même pour les deux observateurs. Selon Aristote, en fonction de l'état de mouvement du boulet par rapport à l'espace absolu, la chute ne devrait pas être verticale, tout au moins pour l'un des observateurs si l'autre est au repos. Ceci permettrait donc à chaque observateur de déterminer sa vitesse par rapport à ce milieu absolu. L'expérience de Galilée démontre sans ambiguïté que la notion d'espace absolu introduite par Aristote ne tient plus. Deux observateurs en mouvement relatif rectiligne et uniforme l'un par rapport à l'autre ne peuvent pas déterminer leur mouvement dans l'espace absolu car ce dernier n'existe pas ! En effet, une ligne droite verticale pour l'état de repos se transforme en une ligne droite inclinée pour un mouvement rectiligne uniforme. Si l'un des observateurs était au repos absolu, l'autre devrait se déplacer dans cet espace et observer une trajectoire inclinée. Or il n'en est rien. Quel observateur aura alors le droit de choisir pour référence le repos absolu ? Réponse : Aucun ou inversement les deux. Chacun a le droit de se considérer au repos puisqu'il n'y a plus de référentiel privilégié pour lequel l'état de repos est manifeste. L'espace perd son caractère absolu et devient relatif pour chaque observateur. Tous les deux ont le droit de se proclamer au repos

et peuvent affirmer que l'autre se déplace. Il n'y a aucune contradiction dans cette assertion. Il faut simplement abandonner l'idée d'une correspondance unique entre différents points ou différentes régions de l'espace à des instants différents. Il n'y a plus moyen de s'accorder sur la position absolue d'un objet dans cet espace. Chaque observateur possède en quelque sorte son propre espace absolu différent d'un autre observateur et fonction de sa vitesse. En revanche, toujours selon Galilée, le temps garde son caractère absolu. Cette nouvelle structure de l'espace relatif et du temps absolu se traduit mathématiquement par un espace fibré de base \mathbb{R}^1 (le temps représenté par un axe réel) et de fibre \mathbb{R}^3 (l'espace euclidien habituel à trois dimensions). L'espace et le temps restent deux notions distinctes et toujours sans interaction mutuelle. Toutefois dans cette description la gravitation n'est pas incluse car on ne tient compte que du mouvement relatif rectiligne et uniforme. Une accélération telle que celle produite par la gravitation serait incompatible avec ce mouvement.

1.3. Relativité restreinte. Une étape importante fut franchie par l'introduction de la théorie de la relativité restreinte en 1905. Le postulat fondamental de la finitude et de l'invariance de la vitesse de la lumière quelque soit l'observateur inertiel, c'est-à-dire en mouvement rectiligne et uniforme, et du principe de relativité de Galilée remettent en cause la notion de temps absolu ainsi que les idées fondamentales de simultanéité qui s'y rapportent. On doit à Minkowski l'idée fort judicieuse et audacieuse de mêler l'espace et le temps en une entité unique qu'il appela l'espace-temps. En relativité restreinte, l'espace et le temps sont relatifs mais la fusion des deux, l'espace-temps, reste absolu. On retrouve en quelque sorte les idées d'Aristote d'un « espace absolu » mais sous la forme d'un espace à quatre dimensions contenant d'une certaine manière l'axe du temps. Une interrelation forte entre espace et temps existe, l'un pouvant être converti en l'autre et réciproquement, dans une certaine limite imposée par la constance de la vitesse de la lumière (pour satisfaire le principe de causalité). Un temps peut être facilement converti en espace par la formule $x = ct$ où c représente la vitesse de la lumière. La notion traditionnelle de distance à 3 dimensions dans un espace euclidien est généralisée à un espace pseudo-euclidien à 4 dimensions, la dimension supplémentaire représentant l'axe temporel converti en unité de distance. Le caractère pseudo-euclidien de ce nouvel espace complique l'interprétation physique du comportement relativiste des corps massifs. Dans cette approche, le postulat de la constance de la vitesse de la lumière est interprété comme une propriété géométrique fondamentale de l'espace-temps que l'on appelle espace-temps de Minkowski. Un rôle fondamental est joué par les cônes de lumière, c'est-à-dire les surfaces (ou plus exactement les volumes que l'on baptise des hypersurfaces) sur lesquelles se déplacent les rayons lumineux dans cet espace-temps à quatre dimensions. En relativité restreinte, quelque soit l'observateur et quelque soit sa position et sa vitesse dans cet espace-temps, les cônes de lumière sont invariants. Les observateurs ne s'accorderont jamais sur la mesure des distances et des durées séparément mais toujours sur la forme des cônes de lumière. À l'époque pré-relativiste, avant 1905, un événement A, se déroulant à un endroit donné et à une date donnée, ne pouvait se trouver que dans le passé, le présent ou le futur d'un autre événement B. L'indication était simplement fournie par le relevé du temps indiqué par les horloges en A et B. En relativité restreinte, il existe une quatrième possibilité que l'on nomme l'« ailleurs ». L'ailleurs correspond aux événements qui ne peuvent être classés ni dans le passé, ni dans le présent ni dans le futur d'un autre événement A. Ils ne sont pas inclus dans le cône de lumière dont le sommet coïncide avec l'événement A. Cela signifie qu'un événement C situé dans l'ailleurs de A ne peut pas influencer A par l'émission d'un signal. On parle alors d'événements causalement déconnectés. La réciproque est vraie, à savoir que A se trouve dans l'ailleurs de C. C'est une autre conséquence immédiate de l'invariance de la vitesse de la lumière. La structure géométrique fondamentale de l'espace-temps est inscrite dans ces cônes de lumière. Mathématiquement, cette propriété géométrique se traduit par

l'invariance de la distance d'espace-temps entre deux points spatio-temporels une sorte de généralisation du théorème de Pythagore à quatre dimensions.

1.4. **Gravitation.** Jusqu'ici il n'a pas encore été question de gravitation. Comment intégrer cette force de gravité dans la discussion précédente ? Tout simplement en se ramenant à une situation sans champ gravitationnel c'est-à-dire sans accélération. Cela est possible grâce au principe d'équivalence introduit par Einstein. Ce principe d'équivalence, découlant du constat d'un fait observationnel très bien vérifié expérimentalement avec une grande précision, permet en effet de s'affranchir des effets de la gravitation en se plaçant dans un référentiel judicieusement choisi : le référentiel de chute libre du corps matériel. Dans la vision einsteinienne du monde, l'état de repos naturel d'Aristote est remplacé par le mouvement de chute libre du corps « tombant » localement dans un champ gravitationnel fixé. Les effets de la gravitation s'annulent donc dans ce référentiel particulier, dans une petite région autour dudit corps. En appliquant le principe d'équivalence, c'est-à-dire en se plaçant dans ce référentiel de chute libre, il est possible de faire abstraction de la gravitation et les lois de la relativité restreinte s'appliquent localement pour cet état de mouvement. Mais cette approche n'est valable que localement dans une région d'espace petite et durant un temps faible par rapport aux échelles spatiales et temporelles de variations du champ gravitationnel. À différentes régions d'espace-temps correspondent différents référentiels de chute libre liés entre eux de manière non triviale, non incluse dans la théorie de la relativité restreinte. Le lien entre ces différents référentiels est réalisé grâce à la théorie de la relativité générale, en 1915. Cette théorie montre comment connecter les structures de ces référentiels par une approche géométrique via les espaces de Riemann inventés au milieu du XIX^{ème} siècle par le mathématicien allemand du même nom. Les espaces de Riemann sont des espaces courbes pour lesquels tous les postulats d'Euclide ne sont pas satisfaits, comme par exemple sur une sphère sur laquelle deux droites parallèles peuvent se rejoindre. La relativité générale franchit un pas crucial supplémentaire par rapport aux théories physiques précédentes en montrant que le contenu matériel de l'espace-temps modifie l'espace-temps lui-même. L'espace-temps a donc perdu son caractère absolu tel que spécifié en relativité restreinte. L'espace-temps dicte la trajectoire des corps qu'il contient en les forçant à suivre un mouvement de chute libre (ce que l'on appelle des géodésiques en termes mathématiques). En retour, ces mêmes corps modifient la géométrie de l'espace-temps et donc influent de manière significative sur notre perception des longueurs et des durées. On remarquera que dans cette théorie de la relativité générale, il n'y a aucune hypothèse de départ sur une éventuelle géométrie a priori de l'espace-temps. Elle dépend entièrement du contenu matériel. Einstein réussit à inclure dans sa théorie de la gravitation certains concepts chers à la vision de Mach de l'Univers. D'après Mach, les propriétés d'un corps dépendent du contenu matériel du reste de l'Univers. L'inertie (ou la masse) d'un corps n'a de sens qu'en présence d'un autre corps et provient de l'interaction avec le milieu environnant. Mesurer un mouvement ou une accélération se fait par rapport à ce deuxième corps. Selon les idées de Mach, l'état de mouvement d'un corps est influencé par les objets qui l'entourent. On donne souvent comme exemple d'illustration instructive l'expérience du seau d'eau de Newton dont la surface se courbe sous l'action de la force centrifuge. Les propriétés d'un corps en mouvement n'ont de signification que par rapport à un autre corps. L'inertie et donc la masse d'un corps se mesure par rapport au reste du contenu de l'univers. On ne peut pas attribuer une masse ou un mouvement à un objet isolé dans l'espace : il est impossible de décrire sa trajectoire sans référence à d'autres objets. La notion d'espace géométrique, un objet mathématique, vide de tout contenu n'a pas de sens en physique. Seule la présence de corps matériels donne un sens à cet espace.

La théorie de la gravitation obtenue par Newton peut être transcrite en langage d'espace-temps. C'est le fameux mathématicien Élie Cartan qui donna une description de la gravitation newtonienne sous forme géométrique. Dans cet espace-temps de Newton-Cartan, le

temps lui aussi perd son caractère absolu. L'espace et le temps deviennent relatif à l'observateur. L'intérêt de l'espace-temps de Newton-Cartan est de permettre une interprétation intuitive de la notion d'espace-temps qui trouva toute sa splendeur dans la théorie einsteinienne de la gravitation évoquée ci-dessus.

Conceptuellement la théorie d'Einstein est plus simple que celle de Newton. Les notions de force et d'action à distance disparaissent au profit d'un espace-temps en perpétuel mouvement. L'espace-temps est devenu un champ dynamique comme tout autre champ de la physique (champ électromagnétique par exemple). Il n'y a plus aucune référence à un état de mouvement privilégié. D'ailleurs l'espace-temps lui-même est déterminé a posteriori par son contenu matériel. Il n'y a pas d'hypothèse de base sur son état initial. Tous les référentiels sont équivalents, qu'ils soient inertiels ou en mouvement accéléré. Galilée nous a appris qu'il n'est pas possible de définir une position absolue dans l'espace mais uniquement des vitesses relatives. Einstein est allé plus loin et nous affirme qu'il n'est pas possible de définir une accélération absolue mais seulement une accélération relative. Un objet ne peut pas ressentir une force absolue (par rapport à quel état de repos) mais uniquement une force de marée, c'est-à-dire une différence d'accélération entre lui et un autre corps. En ce sens, Einstein a réussi à inclure partiellement dans sa théorie les idées de Ernst Mach sur le mouvement des corps.

1.5. Relativité générale. La relativité générale, par l'intermédiaire de la notion d'espace-temps, est une théorie relationnelle entre objets, c'est-à-dire qu'elle ne fait que décrire les interactions entre corps matériels, indépendamment de toute trame de fond. Il n'est plus nécessaire ni d'ailleurs utile de faire référence à une scène fictive sur laquelle se dérouleraient les événements. La notion de cône de lumière de la relativité restreinte reste valable localement mais, de point en point, l'orientation de ces cônes peut changer. Cette variation dans la géométrie des cônes fournit une indication précieuse sur la structure (la géométrie) de l'espace-temps, indépendamment de l'observateur. La notion de mesure par échange de signaux lumineux est essentielle pour une bonne compréhension des effets de relativité générale. Localement, dans le référentiel inertiel, la physique est très simple. Vu d'un observateur non local, éloigné de la scène où se déroulent les événements, la physique peut sembler plus compliquée. La relativité générale décrit la manière de relier les expériences in situ aux observations d'un observateur lointain. La notion de référentiel est donc centrale. Un système de référence ou référentiel est défini par la donnée d'un système de coordonnées spatiales pour la mesure des distances et d'une horloge pour la mesure des durées. Un tel choix est tout à fait arbitraire et insignifiant pour les phénomènes physiques.

2. REMARQUES MUSICOLOGIQUES ET APPROCHE GÉNÉRALE

2.1. L'écriture de l'espace et du temps en musique. De quelle manière l'évolution du concept d'espace temps en physique pourrait-elle modifier l'imagination, la composition et la réalisation d'une œuvre artistique à notre époque ? L'objectif n'est pas de transposer schématiquement des lois physiques dans un cadre artistique : il serait naïf de croire que cela serait aussi simple, la création répondant à ses propres problématiques intellectuelles, techniques, historiques, esthétiques, cognitives... L'objectif est donc de favoriser un territoire commun, un espace idéal pouvant dégager des lignes de forces conceptuelles qui, même si elles sont dans un premier temps trop simplificatrices et en conséquence fausses scientifiquement, prennent un sens dans le cadre qui nous occupe. Car la question posée est bien l'invention ou la création d'espaces-temps inhérents à la pratique de la composition. Le compositeur tente en effet de créer ses propres univers multi-sensoriels qui comportent à la fois du temps et de l'espace, cette création ayant une histoire qu'il s'agit de prendre en compte, de la même manière que cette recherche se nourrit d'une histoire de l'astrophysique. Même si les pratiques scientifiques et artistiques répondent à des exigences et des évaluations différentes, elles trouvent ici des points de convergence qui pourraient paraître étranges tant ils sont d'une certaine manière particulièrement forts. D'une interprétation

monolithique et différenciée de l'espace et du temps, dans le domaine musical à la fin du XVI^e siècle avec des œuvres de Gabrieli ou plus tard de Bach (*Messe en si*, Passion selon Saint Mathieu) à Berlioz (*Requiem*) par exemple..., les concepts scientifiques vont tenter de se diversifier, de s'enrichir, de s'assouplir comme "un mollusque" pour aboutir dans le domaine de la physique à la formulation d'un jeu d'interrelations jamais atteint avant 1905 et 1915. On pourrait très bien décrire entre sciences et art une évolution parallèle du concept d'espace temps jusqu'au début de l'époque moderne, les compositeurs comme l'américain Charles Ives ayant même inventé dès 1906 des espaces temps superposés voir indépendants (*Central Park in the dark*, *The Unanswered question*). Les années cinquante et soixante musicales ont vu se développer des poly-temporalités complexes et spatialisées ; œuvres de Stockhausen (*Gruppen*, pour trois orchestres, 1957 ou *Carré*, pour quatre orchestres et quatre chœurs, 1960) de Xenakis (*Terretektorh*, orchestre éparpillé dans le public, 1966), écriture renouvelée de la durée avec Messiaen, Nancarrow, Bancquart, Ferneyhough, l'invention d'espaces comme avec des œuvres de Zimmermann (*Les Soldats*, 1964), de Chowning (*Turenas*, 1972), de Boulez (*Repons*, 1984), de Nunes (*Lichtung*, *Quodlibet*, 1991)... Soulignons que l'écriture est principalement traitée sous forme "linéaire" dans le sens d'une indépendance combinée de l'espace et du temps ou de l'utilisation de relations perceptives connues comme l'effet Doppler, plus que de véritables interdépendances des paramètres constitutifs de la création d'un "espace-temps". D'une autre manière, nombre de compositeurs après 1950 s'inspireront plus ou moins directement de la cosmologie, voici quelques exemples d'œuvres aux titres explicites : Hindemith (*L'Harmonie du monde*, 1957), Cage (*Atlas Eclipticalis*, 1962), Penderecki (*Kosmogonia*, 1970), Stockhausen (*Ylem*, 1972), Gorecki (*2^eme Symphonie « Copernicienne »*, 1972), Crump (*Makrokosmos*, 1973), Glass (*Einstein on the Beach*, 1976), Parmegiani (*La Création du Monde*, 1986), Grisey (*Le Noir de l'Etoile*, 1990), André (*Le trou noir univers*, 1993), Tanaka (*The Zoo in the Sky*, 1995), Eotvos (*Cosmos*, 1999), Parra (*Hypermusic Prologue*, 2009, *Caressant l'horizon*, 2011)... « Je remplace la mathématique par la musique comme langage pour créer une représentation esthétique-émotionnelle au service d'une description du réel [...] et réalise « une interprétation poétique de l'univers que la théorie décrit. Pour le faire, un plasticien opterait peut-être pour un mouchoir négligemment tombé à terre : il ne serait pas tombé à plat, mais épouserait plutôt les formes invisibles d'un univers dont la courbure ne nous est pas immédiatement perceptible. Pour moi, c'est une topologie musicale – au sein des limites sonores fixées au début, je crée un champ de force à haute énergie qui donne, par les interactions entre rythme, espace sonore et espace temporel, cette image d'espace tissé dans le continuum, un continuum sonore. » (propos d'Hèctor Parra relevés par Jérémie Szpirglas, note de programme IRCAM au sujet de *Stress Tensor*, 2009, œuvre pour ensemble instrumental s'inspirant de la théorie de la relativité). La diversité esthétique de ces œuvres fait manifestement et individuellement écho à la personnalité des compositeurs.

Si l'on peut davantage évoquer une esthétique de l'"espace-timbre" ayant des répercussions sur l'écriture du temps dans le prolongement des œuvres de Scelsi et de la naissance de la musique spectrale en 1973, l'espace-temps musical à proprement parlé ne semble pas avoir vécu collectivement et en profondeur sa révolution relativiste. Cette question est donc centrale dans cette recherche, tenter de définir des relations entre paramètres sonores et/ou visuels qui pourraient à terme servir "une écriture relativiste", une esthétique renouvelée de l'invention de l'espace-temps.

2.2. Approche générale. Les effets de la relativité semblent étrangers à nos logiques et à notre perception du monde alors que ces effets existent bien, mais pour qu'ils soient perceptibles de manière frappante à notre échelle (macroscopique et non plus cosmologique ou microscopique), il faudrait atteindre des vitesses proches de la lumière ou des masses très compactes. Il n'est donc pas question de vouloir directement traduire ces grandeurs dans notre recherche d'analogie, ni même de nous engager dans des considérations qui

pourraient sembler, au stade de cette première étude, trop spéculatives ou difficilement réalisables dans le cadre d'applications artistiques. Les questions d'observateurs au repos ou en mouvement, de mouvement uniforme, de type de référentiel ou d'absence de référentiel seraient à approfondir ultérieurement, cherchant ici à définir des premiers concepts singuliers très largement inspirés de la relativité et qui pourraient avoir une forme d'efficacité immédiate sur l'écriture d'une œuvre toujours replacée dans une lecture sous-jacente critique et diachronique de l'histoire de la création artistique, comme nous l'avons souligné au paragraphe précédent.

3. ANALOGIES ARTISTIQUES ET PREMIERS VOCABULAIRES

Continuons à préciser certaines questions relatives notamment au vocabulaire que nous utiliserons pour la définition des lois relativistes.

3.1. Objet concret ou abstrait. La matière est au sculpteur ce que l'objet est au compositeur : un matériau simple ou complexe à partir duquel l'artiste peut imaginer l'ensemble de sa création. Mais précisons que notre définition de la notion d'objet fait ici référence à une entité aussi bien concrète qu'abstraite.

- (1) **Objet concret** : tout type de représentation proche de la matière physique représentée, un OSV (Objet Sonore et Visuel) enregistré sur support numérique comme un fichier vidéo fait parti des objets concrets. La musique concrète est l'exemple même d'une création qui s'est essentiellement développée depuis 1948 à partir d'OC, des sons enregistrés (utilisation de bruits).
- (2) **Objet abstrait** : tout type d'accord, de cellule thématique, de timbre représentant une structures symbolique.... peut faire naître une œuvre (la tierce majeure descendante du début de la cinquième symphonie de Beethoven). Inversement, tout type de structure symbolique abstraite représentée par des nombres [...] peut à l'origine organiser le microcosme et le macrocosme de l'œuvre. Dans ce cas, nous prendrons couramment comme exemple les ensembles homométriques modulo 24, ensembles classés par n-uplets ayant des caractéristiques communes liées à la notion de distance (intervalle en musique, intervalle de fréquence, de timbre, d'intensité, d'espace, de temps....). Ces n-uplets d'ensembles appelés aussi classes décrivent en soi des objets singuliers.

3.2. Espace concret ou abstrait. De la même manière, pour enrichir les possibilités d'applications artistiques, l'espace pourra être relatif aux étendues concrètes ou abstraites

- (1) **Espace concret** ou la "spatialisation" des OSV. Communément, si l'on se réfère à un espace concret comme des zones d'un endroit particulier (zone de l'univers en astrophysique ou en musique, espace délimité par l'emplacement des instrumentistes ou haut-parleurs), cela fait référence par analogie à des notions de positionnement et déplacement sonore et visuel qui ne sont pas toujours simples à réaliser instrumentalement. Grâce au positionnement de quatre clarinettes entourant un public au centre, nous pouvons tenter de simuler "horizontalement" le déplacement d'un son dans l'espace. Cela devient très vite compliqué selon certaines salles de concert ou avec des ensembles plus conséquent comme des orchestres, sans détailler les problèmes posés par les techniques instrumentales pour simuler l'effet Doppler par exemple (notions "de filtrage" et de contrôle continu des fréquences selon la distance), l'informatique notamment ouvrant des possibilités sonores et visuelles beaucoup plus souples mais nécessitant un matériel particulier.

Franck Jedrzejewski, Stéphane de Gérando, *Ensembles homométriques et création sonore et visuelle contemporaine*, Paris, 3icar / icarEditions, 2014.

- (2) Espace abstrait. Dans cet autre cas d'application des concepts relativistes, tout objet ou matériau lié à l'invention d'une œuvre contiendrait son propre espace, espace symbolique entretenant des caractéristiques de distance comme les ensembles homométriques. Rappelons plus précisément que les ensembles homométriques sont des ensembles de nombres dont les distances entre tous les éléments de chaque ensemble sont les mêmes. La notion de distance est considérée ici dans son acception la plus simple par la différence entre deux nombres. L'intérêt de la notion réside dans les ensembles homométriques non triviaux et plus encore dans les multiplets homométriques. Ces classes d'ensembles assimilés ici à des espaces singuliers (un objet peut aussi décrire son propre espace) peuvent tout aussi bien être appliqués à des notions géométriques, physiques, perceptives...

3.3. Temps et espace perçus, vitesse, distance, masse - énergie.

3.3.1. *Temps et espace perçus.* La perception du temps ou de l'espace relève d'une faculté physio-psychologique et culturelle, culture par exemple relative à l'histoire de la musique savante occidentale ou plus globalement à l'histoire de l'art. C'est vrai aussi en physique depuis l'avènement de la relativité, où l'histoire de l'art et de la musique est remplacée par l'histoire de la trajectoire de l'observateur, donc l'histoire de son parcours/mouvement. "L'écoulement ou perception du temps" sera très souvent lié dans le cadre qui nous occupe à une notion d'agogique au sens large du terme (nombre d'événements dans une unité de temps) ou plus basiquement au contrôle du tempo (notions de temps contracté ou dilaté...).

3.3.2. *Vitesse.* La vitesse est une grandeur qui mesure le rapport d'une évolution au temps (vitesse de vibrato, nombre de vibrations par seconde...). Il n'est donc nullement nécessaire de faire référence à une grandeur spatiale : on peut très bien associer une vitesse à tout paramètre physique pertinent pour la description d'un son ou d'une image. D'une autre manière, la notion de vitesse liée au déplacement d'un OC (objet concret) dans un EC (espace concret) est clairement définie (rapport entre la distance parcourue et le temps mis pour la parcourir tel que mesuré dans un référentiel particulier), la transposition de cette notion dans un espace abstrait restant à préciser selon les situations.

3.3.3. *Distance.* La distance est la longueur qui sépare deux objets concrets ou abstraits : sons, source lumineuse, différences entre valeurs d'un même ensemble... Cette notion de distance ne se rattache donc pas uniquement à une longueur "spatiale" ordinaire, mais bien à des espaces abstraits (calcul des distances ou intervalles dans les ensembles homométriques par exemple).

3.3.4. *Masse - énergie.* La masse d'un objet (ou d'un espace) fait ici référence à une quantité concrète ou abstraite comme le contenu spectral d'un son ou d'une lumière (nombre d'harmoniques), le nombre de notes dans un accord, le nombre de valeurs dans un ensemble de nombres...

Par ailleurs depuis l'avènement de la théorie de la relativité restreinte, toute forme d'énergie (thermique, cinétique, électromagnétique) peut être considérée comme une contribution supplémentaire à la masse d'un objet. Cette équivalence entre masse et énergie est symbolisée par la célèbre relation d'Einstein $E = mc^2$ où E représente le contenu en énergie et m la masse de l'objet. Cette relation possède une lecture à double sens. D'une part, une masse peut être convertie en énergie, sous la forme d'un rayonnement, de chaleur comme par exemple dans les réactions nucléaires de fission et de fusion. D'autre part, toute forme d'énergie oppose une résistance au mouvement (une inertie plus communément appelée masse) de l'objet contenant cette énergie.

On peut aussi distinguer les analogies entre masse et énergie de la manière suivante :

- (1) masse = nombre d'harmoniques d'un spectre sonore et lumineux,
- (2) énergie = intensités (amplitudes) relatives à ces harmoniques,

l'énergie faisant davantage penser à des grandeurs symbolisant ici des notions d'intensité ou d'amplitude (nuances des notes d'un accord par exemple).

4. CINQ LOIS ARTISTIQUES RELATIVISTES ET EXEMPLES D'APPLICATION

Nous définissons cinq lois artistiques relativistes propre à enrichir l'invention et la réalisation d'une œuvre contemporaine sonore et /ou visuelle. Afin d'explicitier les analogies et pour chacun des concepts sélectionnés, nous suivrons la description suivante, partant de l'astrophysique pour aboutir au domaine artistique : remarques scientifiques avec loi de référence (1), description simplifiée (2), lois artistiques (3) et exemples d'application (4).

4.1. Première loi : relation entre vitesse et temps.

4.1.1. *Remarques scientifiques (présentation synthétique avec loi de référence).* Le temps pourrait véritablement s'écouler différemment pour deux personnes, mais pour que la différence soit perceptible, il faudrait que les vitesses de déplacement de l'une par rapport à l'autre soient de l'ordre de celle de la lumière (pour une seconde, environ sept fois le tour de la terre). C'est grâce notamment aux accélérateurs de particules et à la durée de vie anormalement longue des muons atmosphériques que l'on peut vérifier ce ralentissement apparent du temps.

La loi mathématique symbolisant cette relation entre le temps apparent perçu par un observateur Δt et le temps propre $\Delta \tau$ indiqué par une horloge attachée au mobile en déplacement est la suivante :

$$(1) \quad \Delta \tau = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Delta t \leq \Delta t$$

où v représente la vitesse de l'observateur par rapport au mobile et $c = 299.792, 458$ km/s la vitesse de la lumière. Noter que cette dilatation apparente du temps ne dépend que de v^2 , elle est donc indépendante de la direction du mouvement. L'effet reste donc parfaitement symétrique entre observateur au repos et mobile en mouvement. Le raisonnement inverse est donc valable sans paradoxe (le mobile mesurant un temps plus long que l'observateur). La contradiction apparente relève d'une mauvaise interprétation de la notion de simultanéité qui dépend du référentiel choisi.

4.1.2. *Description simplifiée.* La vitesse d'un objet modifie sa perception de l'écoulement du temps : plus la vitesse est grande, plus le temps mesuré par cet objet ralentit par rapport à une horloge immobile. Dans l'espace-temps, tous les objets se meuvent à la vitesse de la lumière. Pour un objet au repos, toute sa vitesse est dirigée le long de l'axe du temps, d'où un écoulement apparent rapide. Si l'objet se déplace dans l'espace, sa vitesse n'est plus dirigée entièrement vers l'axe du temps, le mouvement le long de cet axe ralentit, entraînant une perception d'un temps qui s'écoule apparemment plus lentement.

4.1.3. *Première loi artistique relativiste.* **La vitesse de déplacement d'un objet modifie la perception d'un temps.**

4.1.4. *Exemples d'application.*

- (1) Espace et objet concrets. Prenons l'exemple le plus simple (très facilement programmable dans un environnement informatique comme MAX-MSP-JITTER). Utilisons une musique préenregistrée dans on modifie la vitesse de lecture en fonction de sa vitesse de déplacement entre le haut-parleur droit et gauche (contrôle du panoramique et du rapport d'intensité entre les deux haut-parleurs). Autre exemple mais cette fois-ci appliqué à une vidéo de votre propre image projetée en temps réel dans un objet platonicien de "petite taille" sur un écran HD (1920*1080) : le déplacement de cette vidéo sur l'écran modifie sa teinte, sa luminescence et son contraste (perception du temps) (exemple 1).

- (2) Espace et objet abstraits. Que devient cette notion de déplacement et de vitesse dans un espace abstrait comme les ensembles homométriques ? La vitesse de variation liée aux changements de classes homométriques (chaque nouveau espace) définirait par exemple une modification de la perception du temps (exemple 2).

4.2. Seconde loi : relation entre vitesse et longueur des objets.

4.2.1. *Remarques scientifiques (présentation synthétique avec loi de référence).* La dilatation du temps évoquée ci-dessus et provoquée par un mouvement dans l'espace est intimement liée à la contraction des longueurs mesurées dans différents référentiels. Un observateur au repos mesurera une longueur L pour une règle de longueur L_0 dans son référentiel propre (le référentiel de repos de la règle). Mathématiquement cette loi de contraction des longueurs ne fait intervenir que la vitesse relative v entre les deux référentiels sous la forme

$$(2) \quad L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \leq L_0$$

Comme pour la dilatation du temps, le phénomène est symétrique pour les deux référentiels. Noter aussi que la contraction ne se fait que dans la direction du mouvement.

4.2.2. *Description simplifiée.* La vitesse relative entre référentiels modifie la longueur apparente de ces objets selon le référentiel considéré : plus la vitesse de déplacement est grande, plus la contraction de l'objet est importante. La variation des longueurs des corps n'est qu'un effet lié à la manière de mesurer la distance entre deux points d'espace. Observer une longueur nécessite de reporter les coordonnées spatiales à un *instant donné* cela implique donc une notion de simultanéité. Étant donné que cette simultanéité est relative au référentiel considéré, on comprend aisément que la mesure dans des référentiels distincts fournira des résultats différents.

4.2.3. Seconde loi artistique relativiste. La vitesse de déplacement d'un objet modifie la perception de sa longueur.

4.2.4. Exemples d'application.

- (1) Espace et objet concrets. L'application qui semble la plus immédiate est d'associer la taille d'un objet visuel (OV) à sa vitesse de déplacement (exemple 3).
- (2) Espace et objet abstraits. Dans le cadre des ensembles homométriques, toute notion de déplacement entraînera une modification des distances ou intervalles, situation très efficace perceptiblement si l'on applique les distances aux notions d'intervalles des paramètres des OSV (exemple 4).

4.3. Troisième loi : relation entre masse et temps.

4.3.1. *Remarques scientifiques (présentation synthétique avec loi de référence).* La présence de masses influence la perception du temps d'une horloge au voisinage de ce corps et n'implique pas nécessairement un déplacement relatif entre les deux. L'introduction de la gravitation dans le tissu de l'espace-temps devenu malléable a profondément modifié notre conception de l'espace et du temps. L'interaction entre l'espace-temps et son contenu matériel est décrite par les fameuses équations d'Einstein reliant la géométrie de cet espace-temps symbolisée par le tenseur de courbure R_{ik} à la masse-énergie symbolisée par le tenseur énergie-impulsion T_{ik} qu'il contient. En termes mathématiques

$$(3) \quad R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ik}$$

que l'on résume de manière imagée en géométrie = matière. G est la constante de gravitation de Newton. Noter que cette équation possède une lecture à double sens. En effet, de gauche à droite, la géométrie de l'espace-temps dicte le mouvement de la matière et en retour, de droite à gauche, la matière impose la géométrie elle-même de cet espace-temps au travers de la métrique g_{ik} qui généralise le théorème de Pythagore.

4.3.2. *Description simplifiée.* Par exemple la dilatation du temps en relativité restreinte induite par la vitesse relative entre deux référentiels est remplacée ici par une dilatation du temps engendrée par le champ de gravitation (ou de manière équivalente par un champ d'accélération) pour des observateurs situés en des points d'espace différents mais immobiles l'un par rapport à l'autre. Mathématiquement, l'intervalle de temps propre $\Delta\tau$ mesuré par une horloge proche d'une étoile de masse M et de rayon R sera donné en fonction de l'intervalle de temps d'un observateur lointain Δt selon la loi

$$(4) \quad \Delta\tau = \sqrt{1 - \frac{GM}{Rc^2}} \Delta t$$

4.3.3. *Troisième loi artistique relativiste. La masse d'un objet modifie la perception d'un temps.*

4.3.4. *Exemples d'application.*

- (1) Espace et objet concrets. La modification de la notion de masse d'un objet entraîne une modification de son propre temps ou des objets avoisinant. Dans le cadre d'un exemple sonore réalisable simplement avec le programme MSP, on lie le nombre d'harmoniques d'un timbre (masse du son) à l'introduction de formes d'inharmonité du timbre ou du vibrato (perception du temps) (exemple 5).
- (2) Espace et objet abstraits. Le nombre de valeurs d'un ensemble homométrique détermine une agogique (densité des événements) (exemple 6).

4.4. **Quatrième loi artistique : relation entre masse et espace.**

4.4.1. *Description simplifiée.* La présence d'une masse influence aussi la courbure spatiale de l'espace. Toute particule suit une géodésique de l'espace-temps (le plus court chemin entre deux points d'espace), c'est-à-dire l'équivalent de la ligne de droite en espace plat (euclidien). Les trajectoires qui nous semblent incurvées dans l'espace ne sont autres que des lignes droites dans l'espace-temps courbe (c'est l'état de mouvement naturel de tout corps libre, non soumis à une force). De ce point de vue, la déviation des rayons lumineux par une étoile est une illusion, ils filent tout droit suivant une géodésique. Lorsqu'un rayon passe au voisinage d'un corps massif de masse M et de rayon R , il est dévié d'un faible angle α donné par

$$(5) \quad \alpha = \frac{4GM}{Rc^2}$$

La trajectoire des photons permet de sonder la courbure de l'espace.

4.4.2. *Quatrième loi artistique relativiste. La masse d'un objet modifie la perception d'un espace.*

4.4.3. *Exemples d'application.* La masse d'un objet sonore ou visuel (OSV) modifie la perception d'un espace acoustique ou visuel (notions de taille, de courbure, modèles géométriques de déformations non euclidiens).

- (1) Espace et objet concrets. Une courbure de l'espace pourrait correspondre à la simulation de l'acoustique d'un lieu, soit de manière électronique (contrôle de la réverbération...) soit de manière instrumentale, comme simuler une déviation de la trajectoire d'une onde sonore ou d'un rayon lumineux. L'espace courbe est similaire à un milieu matériel possédant un indice de réfraction fonction de la position (déviation des rayons lumineux) (exemple 7).
- (2) Espace et objet abstraits. Nous interpolons deux classes homométriques (espaces différents) en sortant des espaces respectifs (déviation) (exemple 8).

4.5. **Cinquième loi : relativité de la simultanéité.**

4.5.1. *Remarques scientifiques (présentation synthétique avec loi de référence).* Les difficultés d'interprétation des mesures en relativité restreinte ou générale et les paradoxes qui en découlent proviennent essentiellement de la notion de simultanéité qui a perdu son caractère absolu. Deux événements A et B repérés dans l'espace-temps par leurs coordonnées spatio-temporelles (x, y, z, t) dans un repère et (x', y', z', t') dans un autre repère ne pourront pas avoir lieu simultanément dans les deux repères si les positions spatiales diffèrent. Supposons que A et B soient simultanés dans le premier repère c'est-à-dire que $\Delta t = 0$ mais que leur position respective diffère de Δx . Alors dans le second repère, A et B ne seront plus simultanés mais observés avec une différence de temps donnée par

$$(6) \quad \Delta t' = -\gamma \frac{v}{c^2} \Delta x$$

on a introduit le facteur de Lorentz

$$(7) \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \geq 1$$

Tous ces comportements peu intuitifs proviennent de la finitude et de l'invariance de la vitesse de la lumière.

4.5.2. *Description simplifiée.* Deux événements simultanés pour un observateur ne le sont pas nécessairement pour un autre observateur en mouvement relatif par rapport à ce premier. L'expérience de pensée de la propagation de la lumière vue d'une part dans un train et d'autre part sur le quai, et proposé par Einstein, est une illustration simple mais convaincante de cette notion de simultanéité relative. Cette dernière est une conséquence logique de l'invariance de la vitesse de la lumière. Pour s'en convaincre, considérons une source lumineuse placée au centre d'un wagon. Pour un passager assis dans ce wagon, les rayons lumineux frapperont l'avant et l'arrière du wagon en même temps, la distance à parcourir étant la même dans les deux directions. Ce passager qualifiera ces événements de simultanés. Il en va tout autrement pour le second voyageur attendant sur le quai. Bien que la vitesse de la lumière soit identique pour les deux personnes, à cause du déplacement du wagon dans le sens de la marche, la distance à parcourir pour frapper l'avant du wagon sera supérieure à la distance pour frapper l'arrière du wagon. On en déduit logiquement la non simultanéité des deux événements vus depuis le quai. On notera toutefois que l'instant d'émission de ces rayons lumineux est simultané quelque soit l'observateur considéré. En effet, des événements ayant lieu à la même position et au même temps dans un référentiel donné seront vu comme simultanés dans tout autre référentiel. C'est une conséquence immédiate de l'invariance de l'intervalle d'espace-temps.

4.5.3. *Cinquième loi relativiste. Un même objet peut être à la fois dans le présent de l'un, dans le futur d'un autre et dans le passé d'un troisième.*

4.5.4. *Exemples d'application.* Pour développer cette loi, il faudrait préciser la définition d'un auditeur en mouvement comme nous l'avons souligné en introduction.

- (1) Espace et objet concrets. En extrapolant une situation simple en terme de réalisation, avec un auditeur unique qui représenterait la réunion de trois auditeurs ou observateurs en mouvement relatif, on imagine pouvoir percevoir la superposition combinée de 3 états d'un même OSV (passé, présent et à venir). Cette situation peut être simplement réalisée par montage, en imbriquant trois états d'un même OSV (exemple 9).
- (2) Espace et objet abstraits. Nous proposons une combinatoire imbriquée d'ensembles homométriques dont le présent fait apparaître le passé et l'avenir d'un même objet (exemple 10).

5. ESPACE-TEMPS OU OBJET QUADRIDIMENSIONNEL

5.1. Remarques scientifiques. La notion d'espace-temps passe par une définition d'objet quadridimensionnel, dimension spatiale (espace à trois dimensions, largeur (x), hauteur (y), profondeur (z)) dont on ajoute une dimension temporelle. Toutes les notions à trois dimensions spatiales sont généralisées à quatre dimensions dans l'espace-temps pseudo-euclidien. Mais les vecteurs ne suffisent pas. Il faut ajouter des objets mathématique plus généraux que l'on appelle des tenseurs. De la sorte, les lois de la gravitation sont décrites par des notions purement géométriques. Beaucoup de vecteurs et de tenseurs quadridimensionnels ont été créés. Pour approfondir la question, il faudrait en choisir quelques uns pertinent parmi le quadri-vecteur position, vitesse, accélération, impulsion, les tenseurs de courbure, énergie-impulsion, ...

5.2. Exemples d'application. L'espace et le temps sont deux entités liées par la définition d'OSV quadridimensionnels, l'espace devenant une des caractéristiques intrinsèque du matériau musical et visuel. D'une autre manière, un objet ou OS par exemple n'est plus seulement caractérisé par 4 paramètres fondamentaux comme la fréquence, la durée, le timbre, l'intensité, il faut lui ajouter des caractéristiques spatiales qui pourraient être interprétées comme intrinsèques ou extrinsèques à l'objet (espace contenu dans l'objet ou inversement). Un concept d'espace-temps absolu traduirait un fibré dont les propriétés n'évoluent ni dans l'espace ni dans le temps.

- (1) Espace et objet concrets. A chaque pixel d'un écran (deux dimensions) associé à sa couleur correspond un seul type de son déterminé par ces cinq caractéristiques physiques (fréquence, intensité, timbre, cordonnée spatiale) (exemple 11). Comme évoqué, ce concept d'espace-temps absolu n'évoluerait ni dans l'espace ni dans le temps, en dehors de la superposition possible de plusieurs espaces.
- (2) Espace et objet abstraits. Les ensembles homométriques fabriquent des objets visuels à 3 dimensions via le contrôle de nurbs, chaque point de ces objets correspondant à des sons particuliers (exemple 12).

6. SYNTHÈSE DES CINQ LOIS ARTISTIQUES RELATIVISTES

6.1. Définitions initiales.

- La perception du temps ou de l'espace relève d'une faculté physio-psychologique et culturelle, culture par exemple relative à l'histoire de la musique savante occidentale ou plus globalement à l'histoire de l'art.
- Espace et objet sont des entités concrètes (endroit physique /représentation du son ou de la lumière) ou abstraites (représentation purement symbolique). La vitesse au sens large est une grandeur qui mesure le rapport d'une évolution au temps (vitesse de vibrato, vitesse de déplacement....).
- La distance est la longueur qui sépare des objets (concrets ou abstraits).
- La masse représente une quantité concrète ou abstraite (dénombrement, sommation) associé à un principe d'équivalence masse - énergie (grandeur).

6.2. Lois.

- (1) La vitesse d'un objet modifie la perception d'un temps.
- (2) La vitesse d'un objet modifie la perception de sa longueur.
- (3) La masse modifie la perception d'un temps.
- (4) La masse d'un objet modifie la perception d'un espace.
- (5) Un même objet peut être à la fois dans le présent de l'un, dans le futur d'un autre et dans le passé d'un troisième.

7. PREMIER BILAN

Grâce à l'astrophysique et à la définition de notions essentielles, cette première approche artistique relativiste a révélé la notification d'une succession de lois ou règles spécifiques pour la composition d'une œuvre, aussi bien à travers une appréhension concrète qu'abstraite et symbolique des problématiques compositionnelles. Ces lois sont à la fois ouvertes à des interprétations singulières et d'une autre manière déjà particulièrement contraignantes. Si l'on a tenté de simplifier les analogies pour plus d'efficacité et de souplesse d'utilisation, il serait tout aussi possible d'approfondir et de singulariser les liens entre lois artistiques et scientifiques.

Observateur, gravité, force, mouvement uniforme, référentiel, tenseur, quadri-vecteur... autant de notions et d'analogies qui pourront venir renforcer la singularité de cette recherche.

Se pose par ailleurs la question de l'articulation des différentes lois, avec l'invention de règles globales d'utilisation qui pourraient organiser ce réseau de contraintes (une loi regroupant les cinq lois). Ce n'est qu'à cette condition que l'on pourra évaluer l'idée d'une révolution artistique relativiste, avec la création d'œuvres spécifiques.

RÉFÉRENCES

- [1] Aristote, *La Physique* livre III, Chapitre 1er.
- [2] Galilée Galileo, *Dialogue concernant les deux plus grands systèmes du monde*, 1632.
- [3] Newton Isaac, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, 1687.
- [4] Einstein Albert, *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement*, 1905.
- [5] Riemann Bernhard, *Sur les hypothèses sous-jacentes à la géométrie*, 1854.
- [6] Minkowski Hermann, *Espace et temps*, Compte-rendu de la société allemande de mathématique, 1909.
- [7] Jedrzejewski Franck, de Gérando Stéphane, *Ensembles homométriques et création sonore et visuelle contemporaine*, Paris, 3icar / icarEditions (2014)

ANNEXE A. NOTIONS SCIENTIFIQUES COMPLÉMENTAIRES ET VOCABULAIRE DE BASE

Longueur : grandeur physique quantifiant la séparation entre deux points de l'espace et associée généralement à un même objet. Avant l'avènement de la relativité restreinte, on pensait que les corps solides et indéformables existaient. On pouvait choisir une règle (indéformable) comme unité de longueur. Or en théorie de la relativité, de tels objets indéformables n'existent pas. En effet, déplacer cet étalon de longueur équivaut à lui imprimer une force d'un côté, force qui ne sera ressentie de l'autre côté qu'au bout d'un certain temps. Par conséquent la règle sera comprimée donc déformée. C'est une conséquence directe de la vitesse de propagation finie des interactions.

Distance : mesure la longueur séparant deux points de l'espace n'appartenant pas nécessairement à un même corps. Elle désigne l'éloignement entre deux objets séparés. En relativité, les notions de distances sont intimement liées à la mesure du temps. On peut par exemple estimer une distance D par le temps de parcours aller/retour Δt de la lumière puis multiplier par $c/2$ (vitesse de la lumière dans le vide) selon $D = c \Delta t / 2$. C'est le principe utilisé en relativité générale pour déduire la géométrie de l'espace-temps et en particulier ses propriétés spatiales.

Position : indique la localisation précise d'un objet dans l'espace. En pratique, elle nécessite l'introduction d'un système de coordonnées (arbitraire). Dans l'espace absolu, la position est elle aussi absolue, c'est-à-dire fixe par rapport à un fond immuable (l'espace absolu d'Aristote-Newton). Dans l'espace relatif, il est impossible d'attribuer une position absolue à un objet, indépendamment de son contenu. Les positions ne peuvent être que relatives, en ce sens qu'on ne peut repérer un objet que par rapport à un autre (position relative).

Durée : intervalle de temps séparant deux événements ayant lieu à des instants différents. Une durée tout comme une position est relative.

Observateur : être physique imaginaire ou instrument de mesure qui se déplace dans l'espace-temps de manière arbitraire tout en respectant les contraintes du mouvement c'est-à-dire se déplacer à des vitesses inférieures à celles de la lumière afin de satisfaire au principe de causalité. Il est entièrement déterminé par sa position et sa vitesse dans l'espace ou en termes modernes par sa ligne d'univers (sa trajectoire) dans l'espace-temps. Mathématiquement, il est représenté par un quadri-vecteur vitesse de norme égale à c .

Espace absolu : concept mathématique décrivant l'univers comme un ensemble de points immobiles et immuables dans l'espace à la manière d'un corps solide fixe et indéformable. Il ne dépend pas de l'observateur. On peut lui attacher des règles indéformables dans les différentes directions d'espace pour former un système de coordonnées.

Temps absolu : mesure la durée écoulée entre deux événements grâce à des horloges parfaites (toutes ont les mêmes caractéristiques, quelque soit leur position et leur mouvement). Le temps absolu ne dépend pas de l'observateur.

Espace-temps absolu : fusion mathématique de l'espace absolu ou relatif et du temps absolu ou relatif pour former un fibré dont les propriétés n'évoluent ni dans l'espace ni dans le temps. L'espace-temps absolu de Newton tout comme celui de la relativité restreinte est invariant et indéformable. Il n'est pas affecté par les processus physiques qui s'y déroulent. C'est une scène dématérialisée n'interagissant pas avec son contenu.

Espace relatif : la position absolue d'un corps n'a pas de sens en physique. Seules les positions relatives entre les corps sont mesurables et possèdent une signification physique. Il faut abandonner la notion de position absolue (par rapport à quel espace) au profit d'un ensemble d'espaces similaires (mathématiquement une classe d'équivalence). La géométrie de l'espace dépend de l'observateur considéré.

Temps relatif : mesure la durée écoulée entre deux événements grâce à des horloges embarquées avec l'observateur. Le temps relatif dépend donc de l'observateur.

Espace-temps relatif : fusion mathématique de l'espace et du temps pour former un fibré dont les propriétés peuvent évoluer au cours du temps. C'est l'espace de la relativité générale, possédant une histoire se traduisant par une évolution temporelle et spatiale de ses caractéristiques.

Simultanéité : deux événements sont dits simultanés si leur coordonnée temporelle telle que mesurée par un observateur donné sont identiques. En relativité restreinte, la notion de simultanéité est arbitraire. Il existe une infinité de définitions possibles mais en pratique on choisit celle qui est la plus commode.

Gravitation : à l'époque de Newton, la gravitation était une conséquence de la force d'attraction entre les corps massifs. Depuis Einstein, la gravitation est interprétée comme une conséquence de la courbure de l'espace-temps. Rigoureusement parlant, en relativité générale, la gravitation n'existe plus, c'est un artefact lié à la géométrie non euclidienne de l'espace-temps, une sorte de force inertielle comme la force centrifuge (qui n'existe que dans les repères tournants).

Champ de gravitation : En théorie classique des champs, véhicule les interactions entre corps dotés d'une masse. La force d'attraction gravitationnelle de Newton est remplacée par un champ tensoriel : la métrique qui décrit la géométrie spatio-temporelle de l'univers.

Trajectoire spatio-temporelle : lieu géométrique (ensemble de points formés des coordonnées spatiales et du temps) décrit par un objet dans l'espace-temps.

Force : concept physique traduisant l'interaction entre objets distants. La notion de force introduite par Newton n'est pas compatible avec la relativité car dans cette notion simpliste les interactions se propagent à vitesse infinie. La force est remplacée par des champs de force qui se propagent à vitesse finie comme par exemple le champ de gravitation.

Masse inerte : mesure la quantité de matière dont est constitué un objet. Elle quantifie la résistance (l'inertie) au mouvement.

Masse grave passive : mesure la capacité d'un objet à réagir au champ gravitationnel qu'on lui impose.

Masse grave active : mesure la capacité d'un objet à produire un champ gravitationnel. Le principe d'équivalence, central en relativité générale, postule l'équivalence entre les trois masses : inerte, grave passive et grave active.

Inertie : traduit la résistance au mouvement d'un corps subissant une force externe. Se confond avec la masse inerte.

Mouvement : signifie un changement de position (relative) de l'objet. Le mouvement tout comme la position n'est que relatif (déplacement par rapport à un autre objet).

Vitesse : rapport entre la distance parcourue et le temps mis pour la parcourir tel que mesuré dans un référentiel particulier.

Accélération : se manifeste par un changement de l'état du mouvement d'un corps. Rapport entre la variation de vitesse et l'intervalle de temps nécessaire pour produire cette variation. Les notions de mouvement, de vitesse et d'accélération sont toutes relatives à l'observateur considéré.

Repos : état du mouvement dans lequel un objet ne subit aucune accélération et possède une vitesse nulle. Dans la vision newtonienne, le repos se traduit par une immobilité dans l'espace absolu. Dans la vision einsteinienne, il n'y a pas d'état de repos puisqu'on ne peut pas définir un espace absolu, tout au plus un repos relatif par rapport à un certain référentiel. La chute libre peut être considéré comme un état de repos au sens einsteinien.

Corps : entité matérielle de masse et de volume finis.

Objet : idem corps.

Référentiel : tout système de coordonnées permettant de positionner un point dans l'espace par ses coordonnées (x, y, z) et de lui attribuer un temps d'une horloge t .

Référentiel inertiel : en relativité restreinte, tout référentiel en mouvement rectiligne uniforme (mais par rapport à quoi?). En relativité générale, tout référentiel en chute libre est un référentiel inertiel (qui ne subit aucune force extérieure) en quelque sorte au repos.

Coordonnées spatiales : triplet de trois variables permettant de repérer un point dans l'espace (nécessite donc l'introduction d'un système de coordonnées).

Contraction : les longueurs se mesurent à un instant donné. La simultanéité étant relative, deux observateurs obtiendront des mesures différentes de la longueur d'un objet, ils observeront une contraction des longueurs par rapport au référentiel de l'objet.

Dilatation : le temps écoulé mesuré par une horloge en mouvement est plus petit que celui d'une horloge immobile d'où le phénomène de dilatation du temps pour l'horloge fixe.

Ligne d'univers : trajectoire suivie par un objet lors de son évolution dans l'espace-temps.

Dimension : la dimension d'un espace représente le nombre de variables nécessaires pour localiser un objet dans cet espace. L'espace ordinaire possède 3 dimensions et l'espace-temps de la relativité 4 dimensions.

Événement : tout point géométrique (d'extension spatiale nulle) repéré dans l'espace-temps par ces quatre coordonnées (3 spatiales et une temporelle) est un événement.

Événement voisin : tout événement B qui se situe à une distance de l'événement A petite par rapport à la courbure de l'espace-temps est dit événement voisin de A.

Intervalle d'espace-temps : généralisation de la notion de longueur d'un espace euclidien à un espace pseudo-euclidien. Le carré d'une distance peut être négatif contrairement au cas euclidien. C'est un concept géométrique fondamental indépendant de l'observateur. On parle d'invariant de Lorentz. Mathématiquement, l'invariance de la vitesse de la lumière par changement de référentiel se traduit par l'élément de longueur ou intervalle

d'espace-temps défini par

$$(8) \quad ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

C'est un invariant de Lorentz (géométrie invariante des cônes de lumière). On l'interprète comme la distance quadri-dimensionnelle entre deux événements infiniment voisins dans l'espace-temps de Minkowski. Cette distance représente une généralisation du théorème de Pythagore à 4 dimensions dans un espace pseudo-euclidien (le carré de la distance peut être négatif, d'où le qualificatif de pseudo-!). Étant pseudo-euclidienne contrairement à l'espace tridimensionnel ordinaire, l'intervalle ds^2 peut être positif négatif ou nul. On parle de

- intervalle du genre espace si $ds^2 < 0$: il existe un référentiel dans lequel les deux événements ont lieu simultanément.
- intervalle du genre temps si $ds^2 > 0$: il existe un référentiel dans lequel les deux événements ont lieu en un même point d'espace.
- intervalle du genre lumière ou nul si $ds^2 = 0$: représente les trajectoires des photons (les cônes de lumière).

Noter que cette distinction entre intervalle du genre espace, temps ou nul possède un caractère absolu, indépendant du référentiel (observateur) choisi. Ceci permet de définir la notion de passé et de futur absolu à l'intérieur du cône lumière ainsi que la notion d'ailleurs absolu. Le caractère absolu du genre d'un intervalle d'espace-temps est indispensable à la préservation de la causalité en physique : la cause précède toujours l'effet, même en relativité restreinte et générale. Mais cela n'interdit nullement à deux observateurs de repérer le déroulement d'une scène dans un ordre chronologique inversé. L'invariance de la distance (8) se traduit par un groupe de symétrie, le groupe de Lorentz, une sorte de rotation à quatre dimensions dans un espace possédant des coordonnées complexes.

Causalité : principe selon lequel la cause précède toujours l'effet. C'est un pilier fondamental de notre conception de la physique et de la représentation de l'Univers et de ses lois.