

# De l'utilité de la théorie de la relativité d'échelle de L. Nottale en géographie

## Partie 1 : Recherche d'un modèle scalaire spatio-temporel

Martin Ph.<sup>1</sup> Forriez M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université d'Avignon, UMR ESPACE, case 17, 74 rue L. Pasteur, 84029 Avignon cedex. [phmartin@club-internet.fr](mailto:phmartin@club-internet.fr)

<sup>2</sup> Université d'Avignon, case 17, 74 rue L. Pasteur, 84029 Avignon cedex. [maxime.forriez@wanadoo.fr](mailto:maxime.forriez@wanadoo.fr)

**Mots clés :** Espace, temps, échelle, approche déductive, fractale, château, Boves, France.

**Key words:** Space, time, scale, deducting approach, fractal, castle, Boves, France.

\*\*\*

### Résumé :

Ce texte montre comment il est possible de penser ensemble : l'espace, le temps et les échelles mais dans un cadre fractal. Cela conduit à importer en géographie la Théorie de la Relativité d'Échelle de L. Nottale.

Les entités géographiques apparaissent dès lors comme organisées dans l'ordre des échelles selon deux modalités : invariance d'échelle ou covariance d'échelle.

Par ailleurs la TRE explicite l'ubiquité des fractales, objective les limites empiriques et fournit un support théorique à l'idée d'emboîtement d'échelles.

### Abstract :

This text shows how it is possible to think together: the space, the time and the scales but in a fractal frame. It leads to import in geography the Theory of Scale relativity (TSR) of L. Nottale.

The geographic entities appear as organized in the order of scales according to two modalities: self similarity or scale covariance.

Besides the TSR clarifies the ubiquity of fractals, objectivizes the empirical limits and supplies a theoretical support at the idea of imbrication of scales.

## I. Position du problème

Il est de coutume en géographie de localiser un objet dans le temps et dans l'espace. Cela étant savons-nous réellement ce qu'implique ce geste ? A quoi renvoie-t-il fondamentalement ? Ce n'est pas certain (Martin Ph., 2006.f). Pour lever toute ambiguïté il nous faudrait, en

théorie, nous poser la question de savoir quels rapports un objet peut avoir avec le temps et l'espace pris en compte séparément puis envisager quels rapports il peut avoir avec le temps et l'espace considérés conjointement dans un espace-temps.

Par exemple, il est clair que la victoire lors de la bataille d'Austerlitz est largement due à la pertinence de l'action des troupes napoléoniennes tant dans le temps que dans l'espace. Les grandes batailles où le choc prévaut sur le feu sont ainsi des drames où le vainqueur doit logiquement être celui qui articule le mieux la position des corps d'armées donc des bataillons, des compagnies, *etc.*, aux temps de la bataille. Il en ressort l'impression d'une indissociable liaison entre ces dimensions.

Cela étant la géographie a toujours intégré avec des poids différents, selon les moments, le temps et l'espace. Par exemple, nous pouvons considérer que la géographie vidalienne avait plutôt un discours articulé sur des évolutions chronologiques – c'est particulièrement vrai en géomorphologie – à la manière de ce que peut être la vision évolutive darwinienne. Plus tard, dans un balancement attendu, la géographie postérieure à la seconde guerre mondiale, surtout celle des années 1970 - 1980 (Buléon P., 2002) a mis l'accent sur l'espace, sur l'analyse spatiale, mais sans pour autant se détourner totalement de l'aspect temporel, ce qui a conduit à historiciser l'espace géographique, lieu d'affrontement de différentes forces qui produisent, en retour, une humanisation de l'espace naturel.

Dans ces perspectives l'espace et le temps sont des *a priori* kantien de la compréhension du monde, des dimensions relativement passives du jeu qui se déroule. Celui-ci est alors abordé très largement de façon inductive (à partir de son apparence) et en présupposant des fonctionnements généralement linéaires. Cela correspond à tout une gamme d'analyses et de méthodes fondées sur des mesures dans lesquelles les statistiques (gaussiennes ou parétiennes), les études de chroniques, la géostatistique, *etc.* ont une place éminente et sont traduites par moult cartes réalisées plus ou moins automatiquement.

Or aujourd'hui, l'intérêt marqué que certains géographes portent aux sciences de la complexité a permis de développer un discours qui intègre d'autres cas de figures que la linéarité et qui pose en filigrane la question de la relation théorique de ces deux dimensions de l'*a priori* kantien quand, par exemple, elles se trouvent intégrées dans un autre référentiel qui peut être à nos échelles celui de la géométrie fractale. Qu'est-ce qu'une vitesse, rapport d'une longueur par une durée, quand le cheminement parcouru est lui-même une courbe fractale, c'est-à-dire une courbe de longueur infinie entre deux points aussi proches que l'on veut, se demande A. Le Méhauté & *alii* (1998, p. 24) ? Il est clair que la difficulté de la réponse provient de l'irrégularité de la courbe, c'est-à-dire de son déploiement dans l'ordre des échelles.

Dès lors, il est possible de se demander quelles seraient les conséquences perceptibles d'un monde qui cristallise une telle géométrie non-rectifiable ? Il intègrerait, nous

disent A. Le Méhauté & *alii*, « des facteurs d'irréversibilité que le phénomène physique véhicule mais qu'il ne crée pas » (1998, p. 22) mais que notre perception détecte. A la flèche du temps, quel fondement ?

Cela étant nous sommes toujours là dans une explicitation abductive du monde (Martin Ph., 2004, p. 61 et suivantes). La géographie est dans cette situation qui consiste à retrouver le processus à partir du résultat, la dynamique à partir de la configuration spatiale, les interactions individuelles à partir de la structuration sociale. « Moment subjectif », nous dit D. Andler (in Andler D. et *alii*, 2002, p. 1126), qui est « induit et incertain ». La situation inverse c'est une perspective dans laquelle le processus qui produit l'entité cohérente, la forme, l'ordre social qui informe le territoire, *etc.* est directement observable, complètement identifiable et entièrement formalisable. Il est dit « objectif » par D. Andler (2002, *ibis*, p. 1125) qui ajoute : « Ce moment objectif est déductif et certain ».

En conséquence, il est scientifiquement tout à fait possible d'inverser la perspective classique et de partir d'un apport théorique pour envisager des dynamiques qui aboutissent à des organisations spatiales reconnaissables, testables mais cela implique de disposer d'une théorie et d'être dans une logique déductive.

Par exemple, il est licite de se demander à quoi nous aboutirions si, par hypothèse, dans une démarche nécessairement plus déductive, nous bâtissons un modèle du monde qui exclut que ses coordonnées spatio-temporelles soient dérivables en tout point, ce qui revient à dire qu'elles seraient fractales ? Si nous développons un peu, la question devient donc : comment est-il possible d'articuler non plus seulement l'espace et ses trois dimensions avec le temps et son unique dimension mais l'espace, le temps et les échelles.

Il est clair que la géographie vise, cherche, projette d'articuler ces trois éléments pour faire la description de l'interface terrestre (Martin Ph., 2005) qui reste, tout de même, son objet d'étude principal et que dans cette articulation se logent certainement ses apports les plus originaux et les plus utiles. Cela étant, elle le fait en partant de l'apparaître, en développant une perspective essentiellement phénoménologique, ce qui limite le champ de ses études.

Ne serait-il pas possible d'inverser la logique et la pratique et de retrouver un schéma plus scientifique qui consiste à développer une construction abstraite théorique et à la tester en fonction d'observations et de mesures réalisables sur l'interface terrestre ? Le « construit » n'est plus alors le résultat de l'alchimie un peu mystérieuse entre un homme, les hommes, la société et un espace originellement naturel et déployé à plusieurs échelles, mais un modèle formel (une théorie) entièrement explicité et explicitable dont on postule qu'il recèle une part d'intelligibilité du monde et que l'on testera avec autant de soins et d'ardeurs que l'on met à mesurer en tous sens la surface de cette terre ! L'essentiel est alors dans les structures du modèle, dans les relations entre les entités celles-ci ayant, conformément à la position de G. Simondon (Collectif, 1994), une valeur ontologique. Le

réalisme ne concerne là plus les objets en tant que tels mais les relations entre ces objets.

Or que propose L. Nottale (1993, 1998, 2001.a et b, 2002) avec sa Théorie de la Relativité d'Echelle (TRE) si ce n'est de tirer toutes les conséquences de ce que certains aspects du monde peuvent vraisemblablement être décrits au moyen d'un modèle correspondant à un espace-temps-djinn à cinq dimensions (trois de l'espace classique, une du temps et une pour les échelles ; djinn est le nom donné par L. Nottale à la dimension fractale devenue variable, à une constante près) dont les coordonnées sont fractales.

Toutefois, il faut distinguer espace-temps-djinn et espace-temps-échelle, qui sibt deux représentations possibles d'un espace-temps fractal. L'espace(-temps)-échelle est une sorte d'espace des phases servant à décrire les échelles (comme dans une transition de second ordre). Dans ce modèle, la dimension fractale est constante (invariance d'échelle) et demeure une variable secondaire par rapport au temps et à l'espace. Dans le modèle espace-temps-djinn, on considère que la dimension fractale est une variable de même rang que l'espace et le temps. Le djinn correspondant *grosso modo* à une loi de variation de la dimension fractale (covariance d'échelle). Ainsi peut-être pour la première fois en géographie et assurément en géomorphologie des djinns ont été établis empiriquement par l'un d'entre nous (Ph. Martin, 2004).

« L. Nottale dégage [ainsi] une position inédite : la construction d'une visée réaliste qui se confond avec la représentation des phénomènes en tant que résultat d'une relation constitutive entre l'énergie et la géométrie de l'espace-temps » (Barthélémy J. H. & Bontems V., 2001, p. 38).

En résumé, deux cas peuvent se présenter : soit un espace fractal où l'on a une dépendance explicite en fonction de la résolution, qui devient une variable essentielle ; soit un espace-temps-djinn où l'échelle devient une variable dérivée. Dans le premier cas, il s'agit d'un objet fractal au sens de B. Mandelbrot (1967). Dans le second, cet objet est une entité d'une grande, d'une très complexité scalaire. Autrement dit, L. Nottale focalise sur la structure interne, profonde de cette entité comme s'il la définissait « de l'intérieur », alors que B. Mandelbrot l'aborde par sa limite, par sa seule extériorité.

Cela étant les mesures empiriques comme celles développées par l'un de nous (Ph. Martin, 2004, 2006.b, c, d et h) le sont à partir de la distribution spatiale des formes considérées sous le seul angle des variations dont elles sont porteuses (à l'exclusion de toute référence à une dénomination et donc à une signification), ce que l'on dénomme généralement irrégularité du relief, d'une limite, *etc.*

L'une des conséquences, essentielle pour la géographie, de l'approche de L. Nottale est qu'elle fournit un support théorique à l'idée d'emboîtement d'échelles et qu'elle objective les limites qui clôturent les entités. Ainsi non seulement celles-ci en s'auto-constituant produisent leurs limites (fractales généralement au sens de B. Mandelbrot) qui ne peuvent qu'émerger de cet espace-temps-djinn mais en plus ces entités s'articulent scalairement dans une structure elle-même sous la

dépendance des caractéristiques de leur espace-temps-djinn et d'un flux d'énergie (E. Bois, 2002).

Ainsi dans un espace-temps-djinn, retrouve-t-on une donnée primordiale de la géographie : chaque fois que l'on zoome sur un élément de l'espace une nouvelle structure apparaît, complètement emboîtée dans une autre avec par exemple, de la plus petite échelle à la plus grande : le système solaire, la Terre, les plaques continentales (ou océaniques), les unités morpho-sédimentaires, *etc.* mais aussi les associations régionales comme l'Europe, les pays comme la France, les régions comme PACA, *etc.* ou encore : l'homme, le globule rouge, la molécule, les particules, *etc.* La liste n'étant évidemment pas exhaustive mais volontairement transdisciplinaire pour bien montrer que l'ensemble de l'univers (homme et réalisations anthropiques compris) est sous le contrôle d'un espace-temps-échelle à cinq dimensions, ce qui permet au moins de donner une explication à l'ubiquité des fractales.

Ainsi la TRE reprend-elle les éléments fondamentaux (espace, temps, échelle) d'une approche géographique classique mais dans une perspective épistémologique assez différente de la pratique habituelle en géographie. Il n'est donc pas exclu de l'utiliser dans une perspective disciplinaire, au contraire !

Cela étant il s'agit maintenant à partir d'un questionnement disciplinaire, de tester cette théorie et de voir s'il y a dans l'expression tangible du monde géographique des éléments qui la réfutent ou la confortent. En particulier il convient de voir si elle peut fournir un cadre explicatif aux caractéristiques spatio-temporelles de l'organisation de l'interface terrestre identifiées empiriquement et si, en particulier, elle peut correspondre à la fractalité maintenant avérée de bon nombre d'objets de cette interface. En d'autres termes, chemin faisant, il s'agit de bâtir un modèle déductif et explicatif des caractéristiques de l'organisation de l'espace géographique entendu dans sa dimension naturelle et anthropique puisque l'ensemble des phénomènes est, en théorie, passible d'une telle modélisation.

C'est à ces questions sur lesquelles il faut nécessairement se pencher pour déclencher une adhésion de la communauté, que nous allons nous attacher :

- en essayant d'une part de montrer comment l'adjonction de l'idée de « relativité d'échelle » à un espace-temps plutôt classique modifie profondément les termes du problème de la modélisation de l'interface terrestre tout en retrouvant quelques constatations, intuitions, et autres remarques faites depuis longtemps par les géographes ;
- et en exposant d'autre part les premiers résultats obtenus en utilisant la TRE sur l'évolution et l'organisation d'une constellation de châteaux déployée entre le X<sup>e</sup> et le XX<sup>e</sup> siècle autour du site de Boves au sud d'Amiens (Forriez M., 2005).

Ces premiers résultats positifs appellent maintenant de lourdes manipulations qui sont en cours (travaux actuels de M. Forriez et de Ph. Martin) afin de préciser, du moins

nous l'espérons, formellement sur cet exemple, les modalités d'articulation de l'espace, du temps et des échelles productrices de structures temporelles et spatiales. Si ce projet s'avère fructueux, il ouvrira sur la possibilité de constituer une géographie spatiale théorique et déductive dont le futur sera le témoin.

## A. Le temps

La question du temps peut être abordée de deux façons (Martin Ph., ce volume) : soit au travers d'une perception, soit en fonction d'une rationalisation. La perception est à la base de l'*a priori* kantien. Elle conduit à l'idée de déroulement, d'évolution, de sens ou de flèche du temps ; autant de choses qui restent encore largement subjectives. La géométrisation du temps est à la base de sa rationalisation à partir d'une norme (la seconde par exemple), d'un point initial (la naissance de Jésus Christ par exemple) et d'une structure topologique (avant  $\rightarrow$  après,  $t_1 \rightarrow t_2 \rightarrow t_n$ ) que l'on rapproche d'une structure causale (cause  $\rightarrow$  conséquence).

Sur ce mode il est possible de produire une objectivation faible de tous les événements ; c'est-à-dire de les classer conformément au schéma ci-dessus rappelé qui est contraint par l'unique dimension du temps. Cela étant, il est possible de se demander si l'évolution qui fonde par exemple le darwinisme ne pourrait pas être objectivé, non pas au niveau de l'apparaître morphologique ou organisationnel du monde, mais en utilisant une modélisation particulière, en mettant en œuvre une classe de modèles que l'on appelle : fractal log-périodique dont l'expression formelle peut être retrouvée à partir de la TRE ?

C'est ce que nous verrons au travers de l'exemple de Boves mais c'est aussi ce qui a pu être établi avec une très grande probabilité par différents auteurs à partir de données astronomiques, paléontologiques, économiques, biologiques, *etc.* (Nottale L., 1993, 1998 ; Nottale L. & *alii*, 2000). Cela étant, dans cette perspective le temps n'est que le nom d'une des dimensions qui composent cet espace-temps-djinn, à la différence d'un « simple » espace fractal. Il s'agit toutefois d'un espace, mais d'un espace aux structures mathématique et physique particulières.

## B. L'espace

L'espace est lui aussi perçu et objectivé. La différence avec le temps c'est que c'est un ensemble de relations beaucoup plus complexes dans la mesure où l'espace a trois dimensions et dans la mesure où notre perception s'appuie sur des limites (Martin Ph., 2003) tangibles qui définissent la forme des entités déployées (Martin Ph., 2006.a) ; ces formes rétroagissant sur les fonctionnements. Interviennent donc des rapports de taille, des rapports d'échelle quand le numérateur est normé à l'unité et des rapports de position qui conduisent à soulever la question, par exemple, de la cooccurrence dans une aire ou celle de la variation graduelle (ou non : limite) d'un attribut en différents lieux dans une portion de l'espace (zone, région, *etc.*). Ceci ouvre sur l'analyse

spatiale au sens le plus large, sur la géostatistique, *etc.* dans la mesure où nous postulons que cette structuration spatiale n'est pas aléatoire mais dérivée de lois. Toute la question est donc de savoir comment en rendre compte.

La première possibilité consiste à chercher des régularités et à essayer de remonter de ces régularités à une ou à des règles formalisables par induction. La seconde consiste à pratiquer la modélisation graphique c'est-à-dire à s'appuyer intuitivement, ou presque, sur des structures spatiales types, essentiellement euclidiennes, pour essayer d'aboutir à la quintessence de l'organisation spatiale de l'espace étudié mais sans préciser explicitement quelles peuvent être les règles qui président aux localisations. Intervient donc très largement un filtre plutôt de nature idéologique masqué par la schématisation et par l'accessibilité du propos, par la lisibilité associée à la schématisation.

La troisième possibilité est celle qui consiste à partir d'un modèle théorique dont on dérive des conséquences spatiales que l'on vérifie, ou non, sur une disposition spatiale tangible et donc mesurable ; qui joue le rôle de test. Cette démarche est tout à fait envisageable dans le cadre de la TRE et nous donnerons ci-dessous quelques éléments relatifs à l'organisation spatiale de la constellation de châteaux déployée autour de Boves, qui s'inscrit *grosso modo* dans un carré de 75 sur 75 kilomètres.

En résumé, il apparaît comme possible, du moins envisageable, de faire dépendre tant l'évolution historique d'un pays, d'une contrée que certains éléments de la structuration spatiale observée, d'une modélisation qui articule : temps, espace et échelle.

Cela étant pour préciser encore la description du cadre théorique, il nous faut dire quelques mots de cette dimension fractale et des échelles dans un cadre fractal de façon plus générale.

### C. L'échelle

Entre donc en ligne de compte un autre phénomène que connaissent bien aussi les géographes. C'est celui de l'échelle. Classiquement en géographie nous considérons qu'à certaines échelles, c'est-à-dire en fonction de certaines tailles, de certains niveaux, se structurent des cohérences, voire des formes, qui peuvent ensuite être mises en relation avec d'autres entités d'échelle différente, plus grande et dans ce cas la seconde organisation est emboîtée dans la première, ou plus petite et dans ce cas la première est englobée par celle plus vaste développée à petite échelle.

Tout objet géographique est donc forcément encadré par deux échelles : une échelle inférieure à partir de laquelle l'objet n'est plus observable et une échelle supérieure à partir de laquelle l'objet se dilue dans un espace plus vaste. L'échelle entendue comme rapport de taille permet donc d'articuler une discontinuité fondamentale dans le sens où elle fixe une condition d'existence de l'objet géographique étudié. Cette condition d'existence est liée à sa cohérence.

Il est possible d'aller au-delà de ces relations d'emboîtement et d'englobement qui mettent en jeu des

états fixes et des rapports entre états fixes en introduisant la logique de la dimension fractale. Celle-ci est bien connue maintenant (Martin Ph., 2003, 2004, 2005, 2006). Elle consiste à porter une attention aux rapports entre échelles et à établir un formalisme qui rende compte de la façon dont le développement dans l'ordre des échelles se réalise. Les dimensions fractales, « plurifractales » (Martin Ph., 2004.b, c, d, h et à paraître) ou multifractales (Dauphiné A., 2006) en rendent compte.

On voit donc bien ici que la réflexion géographique et que la pratique des géographes auraient pu être considérées comme une première approche de ces questions. Il n'en est rien, semble-t-il, mais cela n'implique pas moins que la culture géographique prépare d'une certaine façon à une pensée qui met en œuvre une logique fractale. Certes il est clair que certains formalismes qui la caractérisent sont difficiles à maîtriser pour qui n'est pas mathématicien mais cela n'exclut rien que soient intégrées, dans la culture géographique, les idées essentielles que véhicule cette forme de pensée. C'est ce à quoi nous nous essayerons ici en limitant autant que faire se peut le recours à tel ou tel formalisme.

Dans une fractale déterministe, le développement dans l'ordre des échelles est infini que ce soit vers les petites ou vers les grandes échelles. Dans la nature, les constructions s'affrontent à la matérialité du monde et le développement dans l'ordre des échelles est limité à une gamme d'échelles particulière par ce que l'on nomme généralement des échelles de coupure (Martin Ph., 2005) qui sont d'une part en relation avec les limites des objets, et d'autre part avec les délimitations de champs académiques. Ainsi à une certaine grande échelle, celle du cristal, passe-t-on de la géomorphologie à la cristallographie. De même pour une échelle très petite passe-t-on de la géographie qui a comme objet d'étude l'interface terrestre, à la cosmologie qui traite semble-t-il de bien des mondes étranges.

Localement, les objets qui ont été déployés selon ce principe récursif fractal sont des objets d'échelles. Il faut bien voir qu'ils sont définis par une structure dont l'idée sous-jacente est simple (rapports entre les échelles) alors qu'ils se donnent à voir comme des objets complexes ou compliqués. Complexes parce qu'ils exhibent des propriétés particulières (non dérivabilité par exemple) ; compliqués parce que les décrire au moyen de mots nous conduit inexorablement à des formulations poétiques, à des images, à des oxymores. Cela étant, les objets fractals sont totalement ubiquistes et la logique fractale est universelle.

La théorie de la relativité d'échelle permet d'identifier cet ordre scalaire comme étant mathématique, ou plus exactement géométrique. Autrement dit, les discontinuités inférieure et supérieure ne sont pas dues au seul hasard. Il existe bien une partition déterminée et déterminable. C'est pour cela que doit être mis en place le concept d'espace fractal, remplaçant celui d'objet fractal.

## II. La présentation de la théorie de la relativité d'échelle

Il n'est pas aisé d'évoquer la Théorie de la Relativité d'Echelle sans avoir, au préalable, rappelé que coexistent en physique deux domaines de recherche majeurs : la physique classique et la physique quantique. *Grosso modo*, la physique classique est celle des ingénieurs et la physique quantique est celle des chercheurs. Cependant, depuis sa création par M. Planck, il est vrai que la théorie quantique de la matière pose de redoutables problèmes de compréhension. Le rêve de tout physicien serait de réussir à traduire les lois quantiques en lois classiques. Il s'avère aujourd'hui que cette démarche est un échec. Cela étant, le chemin inverse, partir des lois classiques pour retrouver les lois quantiques, a également échoué, si bien que la physique actuelle est dualiste. Elle possède deux faces alors qu'elle postule que les lois qui régissent la nature doivent être universelles.

L'un des buts initiaux de la TRE était de réunir les deux branches de la physique, en postulant que les lois découvertes jusqu'à présent n'étaient que des « exceptions » et qu'il nous faut découvrir les lois générales de la nature. Mais la TRE va plus loin : elle explique qu'il existe du classique dans le quantique (ce qui n'est pas un nouveauté), mais aussi du quantique dans le classique (ce qui est révolutionnaire). Au fil des expériences, la TRE dépassa largement les domaines de la physique, notamment en entrant dans le champ d'autres sciences comme la biologie voire dans celui des sciences humaines !

### A. L'ordre des échelles

En simplifiant outrageusement, nous pourrions dire que la TRE se fonde sur l'idée qu'il est possible de combiner la dimension fractale devenue variable (identifiée au djinn à une constante près) à l'espace et au temps dans un modèle général qui de fait comporte cinq dimensions et que L. Nottale appelle espace-temps-djinn (2001.a, p.18). Construire le modèle de la TRE consiste donc à ajouter une dimension particulière à l'espace-temps einsteinien (dans le cas de l'espace-temps-djinn). Que pouvait-elle être si ce n'est une dimension d'échelle, matérialisée par l'emblématique dimension fractale ?

Cette construction fournit une base mathématique fondamentale qui permet de repenser les rapports entre les grandes théories physiques relatives à l'infiniment petit et à l'infiniment grand. Cela étant elle permet aussi comme le souligne E. Brian « de rendre concevable l'itinéraire d'un même phénomène physique d'une position dans cet espace (à cinq dimensions) à une autre, c'est-à-dire pour parler communément, d'un certain niveau d'échelle, ici dans l'espace et à ce moment, vers un autre, ailleurs et dans un autre temps » (2001, p. 6). Cette circulation correspondant à une transformation.

Autrement dit pour illustrer ce propos c'est une démarche qui s'apparente à la possibilité de décrire formellement la transformation d'un processus à la fois dans l'ordre des échelles, dans l'espace et dans le temps comme analogiquement nous pouvons considérer que

l'avait initié, mais dans un espace à quatre dimensions (espace et temps), d'Arcy Thompson reprenant une idée de Goethe lorsqu'il a montré comment par des déformations mathématiques déterministes, il était possible de faire advenir la forme d'un poisson plutôt rond à partir de celle d'un poisson plutôt long (D'Arcy Thompson, 1942, p. 1026-1095 et 1994, p. 267-317). L'exemple est certes aujourd'hui trivial mais garde tout de même une dimension pédagogique. Cette idée est fondamentale et est à la base de la pensée de Cl. Lévi-Strauss comme le souligne très justement J. Petitot (Petitot J., 2004, Martin Ph., 2006.a).

Cela étant les conséquences de cette façon de voir sont importantes : « le concept de « relativité d'échelle » mène à introduire une nouvelle géométrie spatio-temporelle : l'espace-temps devient fractal, ce qui signifie qu'il va posséder des structures à toutes les échelles » (Nottale L., 1998, p. 9). Or dans un tel univers, à l'intérieur des échelles de coupure, le découpage « cartésien » mis en œuvre afin d'obtenir des parties plus simples passibles du critère d'évidence, est peu opérant.

En conséquence la traduction mathématique, technique de cette conception cartésienne que matérialise le calcul différentiel classique devient inopérante. En d'autres termes cette approche conduit à refuser l'hypothèse de dérivabilité et quelque part à remettre en question l'aspect le plus classique de la méthode cartésienne. Toutefois, si l'espace-temps fractal est non différentiable, on peut exprimer un objet fractal *via* des équations différentielles, ce qui est une réelle difficulté pour comprendre cette idée de relativité d'échelle.

Il est donc clair que la théorie formulée par L. Nottale n'est pas totalement en rupture avec les travaux qui l'ont précédé, mais elle les présente d'une manière nouvelle et beaucoup plus approfondie en instrumentalisant l'idée de la relativité d'échelle. Autrement dit, elle s'inscrit dans un cadre parfaitement général et universel, ou tout le moins plus universel que les précédents.

### B. Le principe de la relativité

Le principe de relativité s'énonce de la manière suivante : « les lois de la nature doivent être valides dans tous les systèmes de références (le référentiel), quel que soit leur état » (Einstein A., 1916, *in* Nottale L., 1998, p. 7). Le système de référence est le système de coordonnées. Ainsi mesurer une position entraîne une différence entre au moins deux points. De même pour le mouvement, seule une différence de vitesse a un sens, jamais une vitesse absolue.

La relativité est un principe de la physique moderne qui existe depuis Galilée qui a découvert que « le mouvement est comme rien » (Galilée, *in* Nottale L., 1998, p. 7). « Le mouvement ou le repos n'ont aucune existence propre, seul a un sens le mouvement d'un corps relativement à un autre. Seules comptent les relations deux à deux entre les objets, non leurs propriétés absolues, qui sont dénuées de signification physique » (Nottale L., 1998, p. 7).

La relativité restreinte a été découverte indépendamment par H. Poincaré et par A. Einstein. Elle

établit que l'on peut mesurer l'espace et le temps avec la même unité. D'ailleurs, depuis 1985, le Bureau international des poids et mesures ne sépare plus l'unité de l'espace et l'unité du temps ; ce n'est qu'une seule unité de temps.

La relativité générale montre que « la gravitation n'existe pas en soi, mais que son existence même dépend du choix du référentiel » (Nottale L., 1998, p. 70). La gravitation devient relative. « A. Einstein a été amené à postuler que la gravitation et la géométrie ne sont finalement qu'une seule et même chose. C'est précisément à un tel énoncé qu'arrive finalement la théorie de la relativité générale, en identifiant les effets de la gravitation aux manifestations de la courbure de l'espace-temps » (Nottale L., 1998, p. 75).

Galilée, H. Poincaré et A. Einstein ont créé une relativité du mouvement. Un objet peut être en mouvement dans un référentiel et immobile dans un autre. C'est le cas de tout passager d'une automobile qui est en mouvement par rapport à la route mais pas par rapport à la voiture.

Cela étant comme le note L. Nottale : « Un sens beaucoup plus général peut être donné au principe de relativité, grâce à une extension de la notion de système de référence » (1998, p. 89). Ainsi faut-il distinguer le principe de relativité, des théories qui ont été construites à partir de lui. « L'idée est que le principe de relativité ne s'applique pas seulement au mouvement, mais à toutes les grandeurs qui caractérisent l'état (lequel est toujours relatif) du système de référence » (Nottale L., 1998, p. 89).

Avant A. Einstein, l'espace et le temps sont donc deux espaces distincts : l'un à trois dimensions, l'autre à une dimension. Après A. Einstein, il n'y a plus qu'un espace-temps à quatre dimensions plat (espace-temps quotidien) ou courbe (espace-temps einsteinien). Avec L. Nottale, on essaye de définir une relativité d'échelle, c'est-à-dire une cinquième dimension expliquant la fractalité des objets.

Cela étant, le principe de relativité pose que les lois fondamentales de la nature sont uniques et qu'elles s'appliquent dans tous les cas et dans toutes les situations. « Ce qu'il exprime, c'est que le monde est un » (Nottale L., 1998, p. 94). En liant deux à deux des entités il établit une cohérence et une unité du monde.

Toutefois, il ne faut pas confondre relativisme et relativité. Le relativisme est un cliché posé par la postmodernité qui consiste à dire que tout est relatif. Par contre, « ce qu'affirme le principe de relativité, c'est qu'il existe certaines grandeurs particulières, caractérisant l'état du système de coordonnées, grandeurs qui ne peuvent jamais être définies de manière absolue. En un sens plus général encore, on peut dire que ces grandeurs réalisent l'interface entre nous et le monde extérieur, sur lequel nous voulons effectuer des mesures » (Nottale L., 1998, p. 103). « La relativité consiste en fait en une recherche de l'universel à travers une analyse du relatif » (Nottale L., 1998, p. 104).

Pour la bibliographie, se reporter à la fin de la seconde partie.