

1

Introduction générale

Pour certaines personnes, la géographie a comme principal objet d'étude l'interface terrestre dont la caractéristique la plus évidente est d'être hétérogène. Phénoménologiquement, cette hétérogénéité, qu'elle soit d'origine anthropique ou naturelle, transparait à travers des limites qui définissent des formes déployées dans l'espace terrestre.

Par ailleurs, de plus en plus, cet espace terrestre peut être considéré comme un monde « plein », surtout en zone urbaine. L'une des conséquences en est que les possibilités d'expansion spatiale *stricto sensu* - déplacement des frontières, conquête, changement d'attribut de lieux, *etc.* - deviennent de plus en plus difficile. Cela étant, nature et théories permettent d'identifier un autre « front » dont le rôle apparaît de plus en plus essentiel, mais dont la prise en compte est toujours insuffisante, surtout en géographie. Cette dimension du monde, après celle de l'espace *stricto sensu* (longueur, largeur, hauteur, ou en géographie, longitude, latitude, altitude) et celle du temps, correspond aux échelles (Nottale, 1993 ; Nottale, 1998) ; celles-ci n'étant pas uniquement conçues comme une simple facteur de réduction pour une représentation, mais comme une jauge définissant, en partie, l'information qui peut être obtenue. Dès lors, il est possible de penser théoriser la façon dont cette information varie continûment en fonction des échelles. C'est tout l'objet de la géométrie fractale (Mandelbrot, 1967 ; 1975 ; 1977 ; 1982 ; Nottale et Schneider, 1984 ; Nottale, 1989 ; 1992 ; 1993 ; 1998). Dans ce cadre, la physique possède une gamme d'échelles très étendue qui va de l'infiniment petit à l'infiniment grand. De ce fait, si l'on compare la géographie à la physique, il apparaît que la géographie possède des objets d'étude qui se placent scalairement en position médiane dans ce continuum des échelles de l'univers, et qu'il appartient à notre discipline de formaliser la structuration scalaire du monde autour des échelles anthropiques (10^{-4} et 10^8), et de contribuer ainsi à la définition d'une cosmologie universelle tout en se référant à une base scientifique déductive construite à partir de principes très généraux comme celui de la relativité (Nottale, 1998). Pour autant, cela ne signifie pas que la géographie va se transformer en une « physique géographique ». En effet, la géographie, charnière entre l'Homme et la Nature, peut s'ouvrir à ce mode de pensée afin de permettre la construction d'une véritable théorie géographique. De ce fait, cette thèse espère être un jalon dans cette dynamique qui s'enracine tant dans l'approche multi-scalaire des géographes que dans la possibilité conservée de raisonner tant sur des objets naturels qu'anthropiques. Se pose alors la question de la base commune pour construire une théorie générale de la géographie qui permettrait de dépasser la distinction traditionnelle entre la géographie physique et la géographie humaine. Cette thèse proposera de multiples exemples qui seront issus de la géographie physique ainsi que de la géographie humaine, et qui constitueront autant de briques pour une discussion à venir plus large sur ces questions. Tout ceci implique que cette dimension d'échelle (c'est-à-dire une organisation dans l'ordre des échelles de nature fractale) soit mieux comprise et utilisée puisque cela devient l'une des principales dimensions du développement des sociétés.

L'état de l'art sur la question des échelles en géographie humaine et physique a été, en partie, réalisé à l'occasion d'une question récente proposée à l'agrégation « Echelle et temporalité » (2004-2006) (Baudelle et Regnauld, 2004 ; Volvey, 2005). La question apparaît donc d'une grande actualité. Par exemple, les agglomérations urbaines rivalisent d'imagination pour faire entrer un maximum d'activités et de personnes dans des surfaces au sol aussi petites que possibles (gratte-ciel, immeubles de grande hauteur, ville souterraine, *etc.*). Ceci est une condition d'une maximisation des interactions, des relations, des métissages, condition de l'innovation et de la ville compacte que la crise énergétique actuelle et à venir (*peak oil*) remet sur le devant de la scène dans la mesure où l'étalement urbain est extrêmement coûteux en termes de temps, de matériaux et d'énergie. En d'autres termes, développer une ville dont l'étalement serait limité revient à rechercher une optimisation scalaire, sans abandonner un objectif de qualité de vie, ni une recherche d'intensification de l'usage de la matière grise.

Les formes fractales sont déjà importantes par l'irrégularité ou la lacunarité qu'elles permettent et manifestent, et le sont encore plus par le fait qu'elles sont l'unique moyen de remplir davantage un espace, tout en organisant un stockage de matière, mais surtout d'informations et de lignes, de surfaces, de volumes maximisant les lieux d'échange, conçus comme des « points structurés ». Cette solution est amplement employée par la nature - par exemple, la surface de nos poumons avoisine les 400 m² - ce qui fournit autant de cas à partir desquels il est possible de développer un formalisme physico-mathématique qui modélise cet ordre scalaire. Cela étant, cette maximisation des morphologies d'échange n'a de sens que si l'on considère que toutes activités rencontrent une limite qui est fixée par la vitesse des réactions, du transfert matériel de tel ou tel élément, du temps nécessaire pour associer ceci ou cela, *etc.* En d'autres termes, la fractalité des morphologies d'échanges naturelles montre que les cinétiques des réactions chimiques, en particulier, sont trop lentes par rapport aux débits des flux. Analogiquement, on peut penser qu'il en est de même pour les dynamiques anthropiques, et qu'à côté d'une optimisation par accélération des vitesses (mais l'information financière circule aujourd'hui à la vitesse limite de la lumière), il existe une optimisation par les échelles en établissant des rapports scalaires spécifiques généralement déployées dans l'espace ou localement situés. Ceux-ci ouvrent sur la question de la variation des rapports scalaires dans l'espace dont on peut penser hypothétiquement qu'elle est porteuse de limites ou d'autres discontinuités phénoménologiquement perceptibles.

Pour suivre cette voie, le géographe doit se donner les moyens de construire des outils d'une approche fractale c'est-à-dire d'une approche qui considère la façon de passer d'une échelle à l'autre par une loi spécifique. Dans cette perspective, il apparaît que les dynamiques observées dans l'espace géographique peuvent correspondre tout à la fois à une causalité fonctionnelle (Figure 1. A) (flux circulant et apport ou exportation de matière par exemple), à une causalité formelle (Figure 1. B) (la configuration existante joue un rôle dans les modalités de circulation des flux) et à une causalité structurelle (Figure 1. C) nécessaire, par exemple, pour penser tant les processus sans sujet (Martin, 2004) que la récurrence d'archétypes morphologiques sur différents substrats.

Cela conduit à faire l'hypothèse que les répartitions observées dans l'espace terrestre ne relèvent pas de dynamiques aléatoires, dans le sens où il n'existerait pas de lois, mais des processus dont les dynamiques seraient connues, ne serait-ce qu'à travers des lois de probabilité, et dont les morphologies, et plus largement les structures spatiales, seraient les résultantes. Déployées dans l'ordre des échelles, ces morphologies doivent résulter à la fois « d'effets d'échelle », ou de « force d'échelle » qui traduisent l'arbitrage naturel ou anthropique de « conflits d'échelle » et de « dynamiques d'échelle » (Nottale, 1998). Ceci appelle un processus de théorisation (Figure 1. D) fondé sur les échelles elles-mêmes.

Ceci amène à insister sur une précision fondamentale. La géographie, comme dans d'autres sciences par ailleurs, s'est toujours inscrite dans une approche qui étudie le mouvement, c'est-à-dire la catégorie possédant pour variables d'état celles de l'espace et celle du temps. Partant de ce constant, la théorie de la relativité d'échelle montre que la catégorie « mouvement » n'est pas unique, et qu'à côté d'elle existe une catégorie propre à l'échelle (Nottale, 1998). Cependant, la géographie possède une approche spécifique des échelles, dans le sens où il existe une véritable pensée sur et de l'échelle, ce qui n'est pas le cas de nombreuses disciplines dans lesquelles l'échelle n'est qu'une résolution. Cette thèse s'efforcera de montrer que la transformation de la notion d'échelle en une catégorie propre, indépendante du mouvement, est porteuse, en géographie, de conséquences qui permettent d'ouvrir la porte d'un champ de recherche beaucoup plus large que celui développé à l'occasion de la question de l'agrégation citée précédemment.

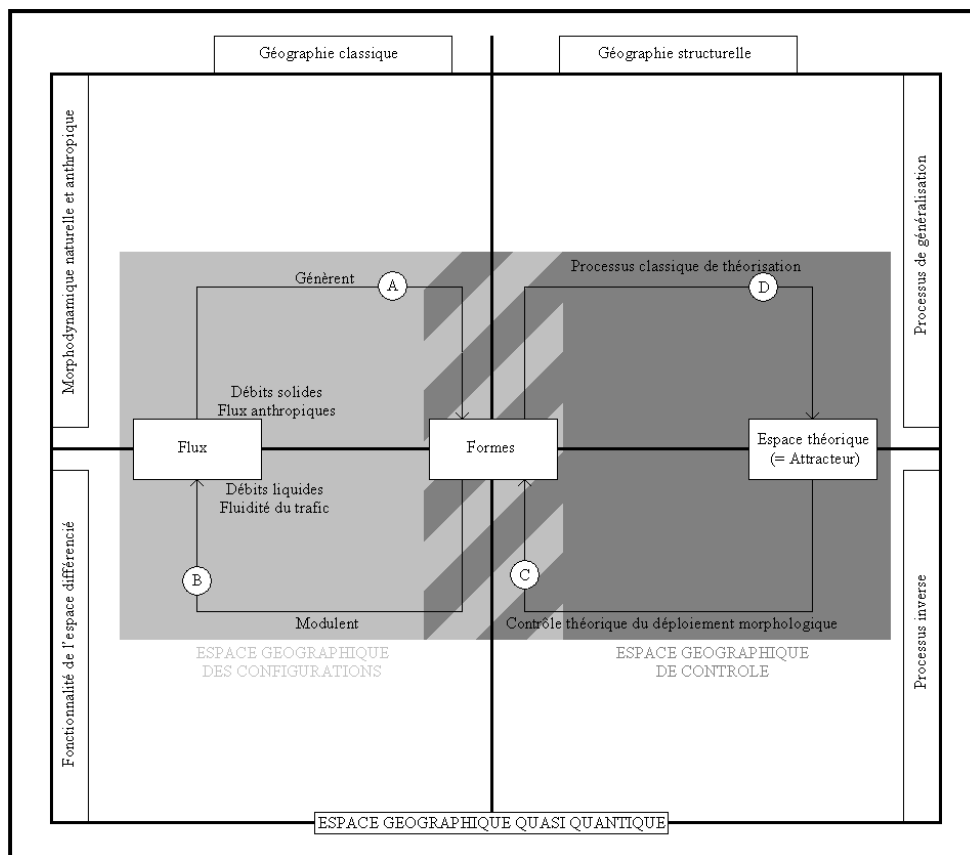


Figure 1. Espace géographique et causalités

Le premier type de causalité (A) renvoie à des études de variables marqueurs du fonctionnement. Le second (B) à la prise en compte du rôle de filtre que jouent les configurations existantes. Le troisième à une démarche théorique (D) qui doit *in fine* modéliser la composante structurale (C), la règle contrôlant en quelque sorte l'apparaître morphologique.

Cette thèse s'articulera autour de trois objectifs.

- Objectif 1. Montrer le lien entre l'étude des formes géographiques et la relativité d'échelle.
- Objectif 2. Définir un cadre multi-scalaire théorique général en géographie capable d'explicitier les morphologies de l'espace géographique, et plus largement les structures scalaires existant en géographie.
- Objectif 3. Articuler le temps et l'espace et leurs échelles respectives dans une démarche géographique.

1.1. Objectif 1. Un lien entre la morphologie et la relativité d'échelle

En partant de l'observation et de la quantification des morphologies naturelles (reliefs principalement) par des méthodes connues, au moins, depuis Henri Baulig (1959), comment est-il possible d'aboutir à une modélisation formelle des conditions théoriques de leur déploiement ? La géomorphologie sera entendue dans cette thèse comme un domaine expérimental très large qui désignera toute analyse morphologique en géographie. En géographie humaine, les actions anthropiques comptent peu, sorties de la petite échelle et sur le temps long. Cela évite d'avoir à traiter immédiatement les questions du choix, de la volonté, de la liberté, *etc.* que ne manqueront pas de se poser pour les morphologies d'origine anthropique.

1.1.1. Mesure de caractéristiques morphologiques

L'expérience montre qu'il est très difficile d'arriver à modéliser les morphologies produites par la circulation des flux, tant en géographie physique qu'en géographie humaine. Cette approche se heurte à la question de la multiplicité des variables et à celle de la multiplicité de leurs combinaisons. Si cela était possible, cela signifierait, d'une part que le problème des processus sans sujet soit résolu - ce qui n'est pas le cas - et d'autre part, que la connaissance des règles structurelles de combinaison de ces variables soit connue (ce qui n'est pas le cas également).

Dans cette perspective, des outils spécifiques comme la géométrie fractale, doivent être mis en œuvre. Il s'agit dès lors, dans un premier temps, de mesurer les caractéristiques fractales d'objets inclus dans un espace qui sera considéré comme euclidien. Pour ce faire et afin d'avoir une statistique des caractéristiques d'échelle, la mise au point d'outils automatisant cette tâche a été une clé dans cette étude, dans la mesure où les outils disponibles, qu'ils soient payant ou gratuit, ne sont pas totalement satisfaisants, tant au plan des solutions formelles adoptées que vis-à-vis de la chaîne des traitements à mettre en œuvre qui ne dépasse pas sa complexité et son ampleur les capacités propres de ces outils. Un apprentissage au logiciel *Mathematica*©Wolfram a été nécessaire. La totalité des calculs est des résultats obtenus, du simple tableau aux cartes, a été réalisée grâce à ce logiciel. On peut envisager l'écriture de très nombreuses pages de calcul dont une transcription et une intégration dans une plateforme plus ergonomique du type système d'informations géographiques peut être envisagée. Ceci correspond à l'arrière-plan de cette thèse qui est déposée à l'Université d'Avignon - UMR ESPACE, ainsi que les données utilisées permettant leur vérification.

1.1.2. Place de la thèse dans les théories de la morphogenèse

Si la morphogenèse est une question ancienne, « la création de nouvelles formes est devenue un sujet de recherche dans de nombreuses disciplines [...] » (Dauphiné, 2003, p. 149). La généralisation de cet intérêt souligne le caractère aujourd'hui primordial de ce questionnement qui s'appuie sur les travaux précurseurs de René Thom (1974 ; 1983 ; 1991 ; 1993) dont la profondeur peut être illustrée par la Figure 2.

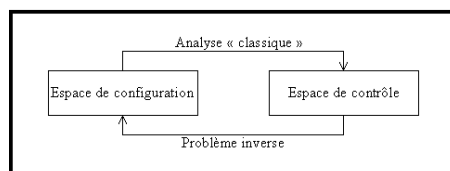


Figure 2. Espace de configuration et espace de contrôle

Classiquement, la morphogenèse correspond à trois situations bien différentes (Figure 3). Il s'agit d'une part de la question de la conservation d'une forme, d'autre part de celle de la modification d'une forme, et enfin de celle de l'émergence des morphologies à partir d'une absence de configuration spatiale prédisposant à cette émergence. Toutefois, « si l'émergence existe dans toutes les sciences, le géographe focalise plutôt son attention sur l'émergence des formes spatiales » (Dauphiné, 2003, p. 150). En géographie, l'espace de configuration correspond à l'espace support : celui des localisations (lieux). Il s'agit d'un état à partir duquel on devrait être capable de construire l'espace de contrôle qui est une description mathématique « simplifiée » de l'espace de configuration et de sa dynamique potentielle.

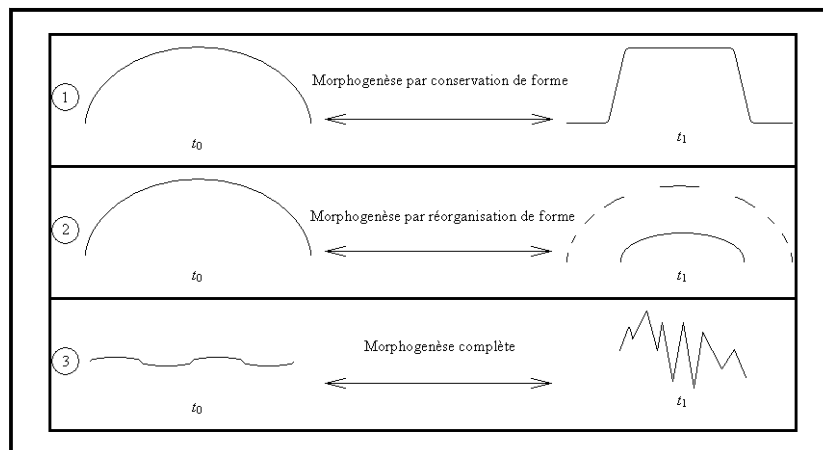


Figure 3. Typologie des morphogenèses

Le type 1 correspond à une conservation de la masse et à un changement de forme, ce qui conduit à une variation de la surface d'échange. Le bilan de masse est nul, car les apports compensent les départs, donc la surface globale reste constante, malgré le changement d'échelle. Elle correspondrait à un moulage, par exemple.

Le type 2 correspond à une conservation de la forme et à un changement de masse. La surface d'échange varie. Le bilan de masse est négatif. Il y a donc un changement d'échelle. La solution inverse est envisageable ; elle correspondrait à un ballon que l'on gonfle, par exemple.

Le type 3 correspond à un double changement de forme et de masse. La surface d'échange varie fortement : dans un cas (à gauche), il y a une « contraction scalaire », dans l'autre (à droite), un « déploiement scalaire ».

Une méthode devenue classique en analyse spatiale consiste à essayer de caractériser ces espaces (attracteurs) parfois à différentes dates, sans toujours chercher à comprendre le rôle de l'espace de contrôle dans la cristallisation de l'espace de configuration. Si l'on prend l'exemple pédagogique de la ville, les travaux menés jusqu'à présent correspondent essentiellement à une approche purement descriptive, notamment par les fractales dont l'objectif final annoncé ou sous-jacent est de caractériser cet espace de contrôle. Dans certains cas, les auteurs réalisent une description de l'évolution temporelle de la dimension fractale (Frankhauser, 1994 ; Tannier et Pumain, 2005). Ces travaux permettent parfois de caractériser des bifurcations, mais après coup. En conséquence, la fractalité avérée n'est généralement pas utilisée dans la modélisation du comportement actuel ou futur du système urbain. L'introduction de la relativité d'échelle en géographie urbaine, et plus largement en géographie physique et humaine, permettrait, du moins en principe, de développer de telles modélisations dynamiques, ce qui devrait permettre éventuellement de se positionner en amont de la bifurcation, et ainsi pouvoir agir à notre convenance sur la direction prise par le système. C'est tout le programme de recherche des théories du chaos (Gleick, 1991).

Actuellement, ce type de réflexion est dominé par les automates cellulaires et les systèmes multi-agents (White, 1998 ; White et Engelen, 1993 ; White et Engelen, 1997). C'est ce que Jean Petitot appelle « l'approche computationnelle » qui est pour lui « la seule façon pour [les] sciences [n'ayant pas la possibilité de recréer leur objet d'étude en laboratoire] d'accéder à une méthode expérimentale authentique permettant de tester les modèles » (Petitot, 1998). Toutefois, même si cette méthode est essentielle et fournit de bons résultats, il n'en demeure pas moins qu'elle ne permet pas de comprendre les raisons profondes de l'émergence des formes. De plus, ces approches sont locales au sens où elles ne sont guère généralisables - ce qui ne veut pas dire qu'elle ne soient pas applicables dans différents cas - dans la mesure où rien, ou presque, ne légitime scientifiquement (principes, lois, concepts) leurs fondements. En conséquence, elles ne débouchent pas sur des lois et offrent des extrapolations spatiales ou temporelles auxquelles il n'est guère possible d'estimer le niveau de véracité. C'est tout l'inverse avec une construction théorique basée sur des principes fondamentaux. Celle-ci peut conduire à des lois de portée universelle. C'est l'un des intérêts de la théorie de la relativité d'échelle.

Cela étant, comme, d'une part, « le monde du géographe est avant tout un ensemble de formes créées par d'innombrables processus physiques et par l'action des hommes » (Dauphiné, 2003, p. 148), et comme, d'autre part, « la nature est un immense réserve de formes fractales » (Dauphiné, 2003, p. 179), d'un point de vue purement conceptuel, on peut espérer que l'approche par la relativité d'échelle permettra de rendre compte de certaines caractéristiques essentielles de ces morphologies comme leurs limites, leurs tailles, leurs rapports réciproques, donc de définir des concepts efficaces et objectifs pour chacune de ces caractéristiques qui renvoie à l'idée de discontinuité (Brunet, 1968), c'est-à-dire celle d'hétérogénéité, ou de différenciation.

1.2. Objectif 2. Un cadre multi-scalaire théorique général en géographie

La démarche multi-scalaire fait l'originalité de la géographie. La paternité du raisonnement multi-scalaire peut être débattu, car la période de l'immédiat après-guerre avait vu naître beaucoup de réflexions sur l'idée d'échelle, mais c'est bien Yves Lacoste (1976) qui a le mieux formalisé cette notion en géographie (Verdier, 2004), et c'est à lui que l'on doit le nom composé « multi-scalaire ». Diverses études en analyse spatiale (Piron, 1990 ; Piron, 1993, par exemple) ont pourtant montré la grande difficulté de quantifier et d'articuler numériquement les différentes échelles en géographie. Cette thèse essaye de montrer les liens plus ou moins complexes entre l'étude multi-scalaire en géographie et la relativité d'échelle de l'astrophysicien Laurent Nottale (1993 ; 1998 ; 2010). En effet, ces deux approches fonctionnent en suivant une philosophie et une analyse commune du monde.

Cette articulation peut se faire, en partie, en passant par le concept de forme. Toute forme pour être définie possède une limite qui contribue à sa clôture logique (cohérence interne) et à sa définition en extension (frontière avec ce qui est autre), mais cette limite n'est visible qu'à une certaine échelle. Ainsi, l'établissement d'une relation entre l'existence d'une forme et l'échelle à laquelle on peut percevoir cette forme transparait. C'est très clair dans la traduction cartographique des formes : à trop petite échelle, la forme ne peut être signifiée ; à trop grande échelle, elle déborde du cadre de la carte. Dans un cas comme dans l'autre, cela conduit « automatiquement » à modifier la problématique géographique et à l'adapter à l'échelle de la carte, donc à la taille de la forme.

La notion de limite en géographie, tant humaine que physique, est consubstantielle à notre discipline dans la mesure où il n'y a pas de géographie possible dans un espace homogène. C'est pourtant dans le cadre d'un espace homogène que Roger Brunet construisit la table des vingt-huit chorèmes. Cela étant, cette notion en géographie demeure encore très empirique, car elle n'a été abordée qu'à travers une perception (approche phénoménologique) et des mesures qui lui sont propres (caractérisation fractale par exemple), ou qui l'instrumentent dans des travaux sur des aires (ensemble de lieux dotés d'attributs divers) qu'elle enclôt (zone urbaine, forêt, *etc.*). C'est toute la question du découpage de l'espace par le géographe qui est appelé parfois par le politique à fixer des limites générales et indispensables à l'application d'un droit, d'une mesure, *etc.* C'est donc une des démarches fondamentales de territorialisation, d'appropriation dans tous les sens du terme (contrôle physique, matériel, imaginaire, juridique, *etc.*) d'un territoire. Moultes exemples historiques témoignent de cela tant lors des phases de conquête (colonisation sud et nord américaines, africaine, *etc.*) qu'à l'issue de conflits (cf. les traités de Versailles, du Trianon, *etc.*). Plus prosaïquement, une ZEP, une ZNIEF, un PLU, par exemple, nécessitent une limite. Ce fut peut-être un des grands intérêts de la géographie régionale que de se poser cette question en évitant d'y répondre par des évidences. Quelle est la limite de la région lyonnaise ? Quelle est celle du territoire méditerranéen de la France ? Quelle est celle de la latinité ? En d'autres termes, on peut déplorer que peu de choses, en dehors des intensions et des fragiles éléments indiqués ci-dessus, ne vient étayer conceptuellement et théoriquement cette notion, pourtant centrale de la géographie, ce qui explique d'ailleurs, tant le flou de ce concept largement prospectif que l'importance numérique du vocabulaire qui essaye d'en faire le tour : limite, discontinuité, front, marge, frontière, *etc.* Cela même si l'on peut donner ou trouver des définitions à tous ces termes. Généralement, chacune donne une explication de ces dénominations sans que leurs causalités fondamentales (structurelles) ne soient abordées. Comment expliquer que le monde ne soit pas homogène autrement qu'en le constatant, et en remarquant que s'il n'en était pas ainsi, on ne serait pas. La limite est donc un attribut de la vie et de la conscience.

En conséquence, le choix de telle ou telle limite reste largement arbitraire, c'est-à-dire qu'il dépend fortement de l'individu ou du groupe d'individus qui la perçoivent, et qui ont eu à la tracer (cf. les problèmes de frontière). Reste donc entière la question de l'explication de l'émergence des limites dont l'ubiquité tant pour des objets naturels qu'anthropiques conduit à faire l'hypothèse qu'elle renvoie à des mécanismes généraux, aussi bien pour des morphologies naturelles que pour des formes anthropiques. Par ailleurs, lorsque l'on étudie cette limite en tant que telle, on s'aperçoit que la géométrie adaptée à sa description est souvent une géométrie particulière (dans le sens où elle est peu employée) qui est celle des objets irréguliers ou lacunaires. Cette géométrie que Benoît Mandelbrot a qualifiée de « fractale », met en exergue des caractéristiques spatiales difficilement accessibles par la simple perception visuelle, voire auditive. Par ailleurs, la complexité vernaculaire du monde ne se comprendrait pas sans des entités plus ou moins spécifiques et spécialisées. Toutefois, celles-ci ne peuvent exister sans être délimitées, donc l'explication d'une forme de la complexité du monde, c'est-à-dire de l'espace géographique, passe par l'explication générique des limites.

À un certain niveau de généralisation et d'abstraction, le propre de la géométrie fractale est d'étudier les relations entre la morphogenèse (l'apparition d'une limite, donc d'une forme qui s'isole d'un fond) et le concept d'échelle qui, dans une première approche, peut être mis en œuvre à travers celui d'échelles géographiques conçues comme étant à la fois un rapport homothétique (1 / 25 000 par exemple) et une assimilation implicite du numérateur à la taille de l'homme (Volvey, 2005), ce qui fait que peut être établi une correspondance entre la taille d'un objet, ou d'une entité, et l'échelle qui permet de le ou la représenter dans un document à l'échelle humaine, à l'échelle du mètre carré essentiellement (cf. la taille des cartes).

Cette approche géographique contient donc implicitement l'idée de découpage, de délimitation ce qui conduit le géographe à procéder à de tels découpages ou délimitations (l'exemple le plus emblématique est peut-être celui de l'établissement d'une frontière) en s'appuyant sur des limites visibles (crête, cours d'eau, littoral, *etc.*) ou construites (limite de l'aire de vie d'une population parlant majoritairement la langue *x*, « bordure » d'une ville, *etc.*). Cela étant, même si ces limites sont identifiées ou identifiables, rien n'est dit, dans cette démarche, sur les raisons fondamentales de leur existence. D'où émergent-elles ?

En effet, la limite peut être abordée théoriquement en se questionnant sur l'échelle à laquelle elle apparaît, pour une entité, et à laquelle elle disparaît pour cette même entité - ce qui définit la gamme d'échelles de l'entité - dans un cadre théorique fractal. Autrement dit, il est possible de postuler qu'il existe un lien modélisable entre la limite que pose le géographe, et la gamme d'échelles en œuvre dans l'entité : entre cette gamme et l'échelle de perception d'une entité.

Roger Brunet (1968) s'est penché précocement sur cette question bien avant qu'elle ne fasse retour autour d'une thématique proposée à l'agrégation de géographie au tournant du siècle (cf. les travaux sur « échelle et temporalité en géographie »). Il avait alors identifié trois grandes catégories de limites en géographie : le point, la ligne, la surface. Aujourd'hui, on pourrait ajouter les volumes à cette liste, ce qui ne la dénaturerait pas dans la mesure où, de toute évidence, elle correspond à des archétypes euclidiens comme le cercle, le carré, *etc.* Toutefois, historiquement, c'est au même moment, ou presque, que Benoît Mandelbrot (1967) fit cette remarque pleine de bon sens qui change tout : « les nuages ne sont pas des sphères, les montagnes ne sont pas des cônes, l'aboiement d'un chien n'est pas régulier et la lumière ne se propage pas en ligne droite ».

Au-delà du truisme, et peut-être parce que c'est un truisme, cette remarque ouvre des perspectives extraordinaires. Là où Euclide, et bon nombre de mathématiciens prestigieux avaient considéré que le problème essentiel, car premier à être abordé, était celui des courbes lisses (les coniques par exemple) Benoît Mandelbrot affirme, lui, que la question fondamentale est celle des courbes non dérivables, des courbes ou des surfaces phénoménologiquement irrégulières, les formes euclidiennes devenant l'une des limites de cette irrégularité lorsque la dimension tend vers 0, 1, 2, 3 pour des objets dont la dimension topologique est successivement 0, 1, 2, 3. L'autre limite étant celle de l'irrégularité « totale » lorsqu'une entité de dimension topologique 0 tend vers 1, celle de dimension topologique 1 tend vers 2, *etc.*

On voit, dès lors, comment la posture historiquement datée de Roger Brunet doit nécessairement être dépassée, et cela, même si, comme il l'a affirmé à juste titre, toute discontinuité est une manifestation fondamentale de l'organisation de l'espace géographique dont la compréhension constitue le préalable fondamental à la construction d'une géographie scientifique. C'est ce qu'essaye de construire cette thèse.

Considérer la limite à partir d'archétypes particuliers de la géométrie euclidienne qui renvoient à une action de perception, ne semble pas être la bonne voie si l'on souhaite développer une approche théorique dans la mesure où rien ne fonde cette limite « choisie » en dehors d'une approche phénoménologique, ou alors il faut naturaliser la phénoménologie, c'est-à-dire faire découler la perception de l'émergence, en particulier, de mécanismes naturels qui, eux-mêmes s'appuieraient sur la manifestation biophysicochimique de l'émergence.

La cohérence fonctionnelle des entités renvoie à une gamme d'échelles finie à l'intérieur de laquelle le rapport entre les échelles peut être invariant ou covariant (cf. Objectif 3). Cette gamme se traduit spatialement (dans l'espace tangible) par la manifestation de la fractalité dans l'ordre des échelles (irrégularité, lacunarité) dans les limites de cette gamme et par la cristallisation de limites dites de coupures aux grandes et aux petites échelles.

Si l'on prend l'exemple d'un arbre qui n'est pas en tant que tel un objet géographique, mais qui est un bon support didactique, il est clair qu'il exhibe une morphologie fractale (à sa limite) où il se structure en échelles selon un mode hiérarchique particulier. Pourtant, chacun sait d'une part que les arbres « ne montent pas au ciel » comme disent les boursiers, et que, d'autre part, il est constitué de cellules végétales. Existence donc tant au niveau de l'enveloppe de chaque cellule (qui n'est pas un objet fractal) qu'au niveau de la frondaison, des échelles de coupure qui sont porteuses de limites phénoménologiquement perceptibles. Il semble en être de même pour bon nombre d'objets dont certains sont géographiques (dont certains entrent dans le projet du géographe) et d'autres non.

Toutefois, parmi les objets géographiques, il faut formuler une remarque qui nuance et complique la question. Lors de certaines phases historiques des villes que l'on perçoit comme presque stables alors qu'elles sont en phase de croissance ou de développement, des limites à petite échelle ont été évidemment présentes, sans quoi l'entité n'aurait pas la cohérence et la clôture qui lui permettent d'exister, qui sont mobiles dans l'espace tangible (interface terrestre), et qui constituent un front (parfois une marge) dont on peut penser qu'il se déplace à la suite de l'intégration d'échelles plus petites ; c'est-à-dire par accroissement de la gamme d'échelles qui constitue l'entité, et pas fondamentalement, à la suite d'un fonctionnement classiquement décrit (flux de matière et d'énergie, voire d'information). Ce développement dans l'ordre des échelles correspondant ainsi à une complexification théorique qui autorise une évolution de l'entité vers un état plus complexe. Cependant, cette complexité scalaire est ici structurellement déterminée, et non pas la conséquence d'un fonctionnement dont rien ne permet de modéliser le sens dans l'espace. Pourquoi y a-t-il concentration et non dispersion à l'échelle d'une ville ? Pourquoi y a-t-il dispersion et non concentration à l'échelle d'un réseau urbain ? Autrement dit, les raisons, par exemple, de productivités liées à la proximité, valides à l'échelle de la ville ne le seraient plus à l'échelle du réseau. De plus, la validité de ces raisons serait contrainte par la taille de l'entité. Ainsi, elle serait donc d'autant plus forte que la taille de l'agglomération croît. La ville finissant par croître parce que la validité croît. Il s'agit ici d'une relation circulaire tautologique de toute évidence. Il devient, dès lors, par exemple, impossible d'expliquer le tissu de petites villes non agricoles que l'on rencontre partout, et par conséquent la hiérarchie urbaine elle-même, sauf à faire intervenir d'autres facteurs tout aussi spécieux.

1.3. Objectif 3. Une démarche géographique articulant temps, espace et échelles

L'approche empirique par la description du fonctionnement ne peut être la voie essentielle de la compréhension. Ceci n'est pas nouveau et il faut être reconnaissant à Jean-Paul Hubert (1993) de l'avoir souligné et d'avoir indiqué que la géographie ne pourrait sortir de cette impasse qu'en faisant un effort de théorisation.

Toutefois, il apparaît que l'universalité de la géométrie fractale doit conduire à se poser la question de son utilisation dans une approche purement structurelle. En d'autres termes, est-il possible de trouver un formalisme théorique qui instrumente la fractalité afin d'explicitier les règles de niveau structurel qui expliqueraient les processus sans sujet à l'œuvre dans la constitution, par exemple, d'une ville ?

Dès lors, il devient possible de réfléchir en termes de covariance d'échelle (qui est une invariance plus profonde où c'est la forme des équations qui est conservée plutôt que seulement leurs coefficients numériques) plutôt qu'en termes d'invariance d'échelle (qui n'est qu'un cas particulier de covariance) pour chacune de ces morphologies qui se trouvent ainsi liées à un espace à cinq dimensions (trois dimensions de l'espace classique, une correspondant au temps, et une autre pour la dimension d'échelle) ; l'étape suivante consistant à caractériser des lois d'échelle. Cela peut se faire en posant comme principe fondamental - comme cela a déjà été fait en physique - que ces lois ne doivent pas dépendre du référentiel utilisé (en introduisant l'échelle dans la définition de l'état du référentiel) cela afin d'accéder à une universalité maximale.

Ainsi, comme dans la théorie de la relativité généralisée, la mise en œuvre de la covariance dans des modèles morphogénétiques permet de construire des équations relativistes d'échelle. Les solutions de ces équations définissent les lois d'échelle possibles, c'est-à-dire des lois caractérisant de façon explicite la dépendance des diverses grandeurs en fonction de la résolution. Cela revient à établir la façon dont ces grandeurs se transforment lorsque l'on passe d'une échelle d'observation à une autre. C'est ainsi qu'un véritable espace des échelles (espace contenant toutes les résolutions) est défini et permet d'aborder de manière nouvelle la question de l'organisation interne des systèmes structurés en échelle. Il est clair que cela est fondamental tant en géographie humaine qu'en géographie physique.

Parmi les lois déduites de ce formalisme, le géographe retrouvera les lois suivant un modèle « puissance », qui sont des lois de type fractal (invariance d'échelle), qu'il avait utilisées dans un cadre empirique. Elles sont maintenant, dans le nouveau cadre, établies à partir de principes universels tant pour les lois les plus simples que pour les lois les plus générales. Parmi celles-ci, on peut citer celles qui intègrent des corrections log-périodiques, qui ont été appliquées avec succès dans des analyses spatio-temporelle (Forriez, 2005 ; Forriez et Martin, 2008 ; Martin et Forriez, 2008), ainsi que dans des réflexions plus générales impliquant une « dynamique d'échelle ».

Tout comme avec la relativité d'échelle qui mène naturellement à une nouvelle généralisation de la géométrie de l'espace-temps qui n'y est plus seulement courbe, mais aussi non-différentiable (ce qui signifie que l'on ne peut plus y définir une dérivée, donc des vitesses ou des accélérations au sens ordinaire, dans des approches de nature physique) et fractal (c'est-à-dire explicitement dépendant de l'échelle de résolution, cette dépendance allant jusqu'à la divergence quand l'échelle tend vers zéro), il est possible en géographie de penser un espace voire un espace-temps dont les coordonnées sont fractales.

Il faut souligner que ce concept d'espace-temps fractal ne se réduit pas à celui d'objet fractal auto-similaire - popularisé par Benoît Mandelbrot - qui concerne la description empirique d'objets dans un espace qui reste euclidien, mais permet en plus de formaliser tant des lois d'échelle que des dynamiques d'échelle qui sont à la base de toute morphogenèse. Ainsi, en relativité d'échelle, c'est l'espace-temps lui-même qui devient fractal ce qui implique des propriétés nouvelles pour les objets qu'il contient. On peut ainsi hypothétiquement considérer que les formes elles-mêmes, dans une certaine mesure, sont le reflet d'états stationnaires présents dans des attracteurs, plus ou moins étranges (c'est-à-dire chaotique). Ceci conduit à des modèles et des caractérisations qui commencent à être entrevus et qu'il faut préciser *via* cette thèse.

La géographie semble donc être une science particulièrement bien adaptée pour mettre en œuvre les modes d'analyse et les outils de la théorie de la relativité d'échelle. Dès lors, la géographie pourrait tirer un grand bénéfice en termes conceptuels et appliqués de l'utilisation de ces principes et méthodes.

Dans cette perspective, les invariants obtenus par l'analyse des structures spatiales fractales pourraient servir à caler ou à valider la théorisation dont on espère qu'elle permettra de rendre compte de la cohérence par niveau (par échelle dans le langage géographique courant) d'entités, donc de l'émergence des limites de ces entités ; limites qui sont en rapport avec la cohérence de l'entité, qui peuvent être fractales ou non, et qui sont le support d'un certain nombre de réactions ou d'échanges entre l'entité et son

environnement. Derrière cette question se cache peut-être la question centrale de la géographie, du moins, la question sur laquelle une grande partie de sa pratique se fonde, à savoir « qu'est-ce qui détermine les échelles fondamentales de la nature ? » (Nottale, 1998, p. 149).

Dans ce contexte, cette théorisation s'appuie sur une description structurelle qui fait l'hypothèse d'une dynamique d'échelle ; c'est-à-dire d'une dynamique mue par la modification de la gamme des échelles (ou des rapports entre les échelles) dont la conséquence est la mobilité des limites ; limites consubstantielles à la gamme puisque celle-ci, par définition, ne peut s'étendre de moins à plus l'infini. Autrement dit, il s'agit de l'idée qu'à n'importe quelle échelle de nouvelles structures apparaîtront. C'est donc une manière élégante de contourner la difficulté du chaos apparent de cette organisation. L'approche multi-scalaire « classique », celle de Yves Lacoste (1976), l'avait bien identifiée empiriquement.

En d'autres termes, il faut postuler que la dynamique fondamentale est une « dynamique d'échelle » (variation positive ou négative de la gamme d'échelles) qui se traduit par une dynamique dans l'espace tangible. Cela implique que la modélisation doit se situer préférentiellement à ce niveau très théorique et pas seulement au niveau des conséquences tangibles. Elle doit donc porter sur les causes des manifestations phénoménologiquement perceptibles c'est-à-dire sur le niveau de la dynamique « interne » d'échelle.

Ce qui est proposé ici consiste à passer d'une modélisation des manifestations fractales des dynamiques « internes » d'échelle (mesures de caractéristiques fractales, par exemple, mais aussi analyse spatiale d'objets structurés en échelles, mais plongés dans un espace euclidien comme un arbre dans un cube ou une coupe topographique sur une feuille de papier, *etc.*), à une modélisation de la dynamique « interne » d'échelle, elle-même à partir de laquelle conséquemment sera obtenu la modélisation des manifestations fractales de l'espace tangible.

Par ailleurs, le lien entre échelles et limites pourrait peut-être permettre de résoudre le problème de la forme optimale de tel ou tel objet géographique dans la mesure où la gamme d'échelles possible renvoie à des déterminants structurels formalisables à partir d'un espace-temps fractal à cinq dimensions, tel celui conçu et utilisé par Laurent Nottale (1993 ; 1998). Ainsi, la conquête d'un espace des échelles par une articulation des limites entre elles en fonction de leur inclusion ou de leur indépendance permettrait d'offrir de nouveaux outils pertinents aux urbanistes, par exemple, ou tout autre ingénieur.

L'argument qui est au cœur de la thèse est que la géographie est d'abord scalaire avant d'être spatiale. Aussi, une réflexion épistémologique au sujet des échelles en géographie s'imposera, car le terme renvoie très souvent à des réalités fort différentes d'un auteur à un autre. Au terme de cette réflexion, l'introduction des structures fractales permet de faire la transition avec les parties suivantes qui proposeront d'avancer dans ces investigations à travers quelques cas rencontrés tant en géographie physique qu'en géographie humaine. En géographie physique, le cas du réseau hydrographique des Gardons permettra d'introduire les concepts d'arborescence fractale et de transition fractal - non fractal. En géographie urbaine, une réflexion sera menée autour de la définition de la limite des villes. Une première étude s'intéressera aux taches urbaines de différentes villes du monde. Deux études complémentaires seront ensuite menées par l'intermédiaire de la « ville d'Avignon » définie par son réseau intra-urbain et de la répartition du bâti dans la communauté d'agglomération de Montbéliard. Elles auront pour objectif de montrer les rapports étroits entre échelle, limite et irrégularité. En géohistoire, l'étude de la répartition de mottes et de châteaux en Picardie historique consistera à mener une recherche réellement spatio-temporelle sur un temps long (environ dix siècles) tout en explicitant un élément structurant important dans la localisation actuelle des villes et des villages français. En géographie du peuplement, la répartition de l'établissement humain à l'échelle planétaire permettra de réaliser une analyse utilisant l'intégralité des méthodes proposées dans cette thèse. Elle permettra également de réaliser un lien entre peuplement et ville *via* d'une part, les structures rang - taille de chaque État du monde, et d'autre part, une analyse multi-échelle complète. Le plan choisi se structure donc en échelles : on part d'une petite étendue (20-50 km) pour arriver à une grande étendue (la planète entière), en passant par une étendue intermédiaire (200 km).

Partie 1. Échelles, limites et modèles : la forme en géographie

