
Forme et géographie : de René Thom à Benoît Mandelbrot*

Philippe Martinⁱ

Résumé : L'histoire de la forme est un concept complexe qui remonte à l'antiquité grecque, tout au long de cet article nous aborderons différentes facettes de ce concept dans le cadre particulier de la géographie. Nous développerons différentes perspectives sur la forme en géographie et sur son ontologie « locale ». Nous verrons également comment ce concept a été abordé, en géographie physique, en géomorphologie, en tenant compte de divers moments historiques et des cadres scientifiques successifs. La géomorphologie servira de laboratoire physique pour approfondir la notion de forme en géographie. Dans cette recherche nous croiserons des concepts de penseurs de différentes époques tels que Goethe, D'Arcy Thompson, Prigogine, mais surtout, René Thom et Benoît Mandelbrot, penseurs qui nous ont offert les outils pour concevoir une vision renouvelée de la forme en géographie.

Mots-clefs : forme et géographie ; géomorphologie ; dimensions scalaires ; fractale ; morphogenèse.

* DOI : <https://doi.org/10.11606/issn.1980-4016.esse.2023.209349>.

ⁱ Professeur et chercheur en géographie à l'Université d'Avignon, Avignon, France, et membre de l'Unité Mixte de Recherche du CNRS 7300 ESPACE. E-mail : philippe.martin@univ-avignon.fr. ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-0053-6617>.

Introduction

La forme est une notion complexe qui a une histoire très longue (HUYGHE, 1971 ; PETITOT, 1989). Celle-ci remonte au moins à l'antiquité grecque et nous ne pouvons l'aborder, dans ce court texte, après plusieurs essais traitant de ses différentes facettes (MARTIN, 2003a ; 2003b ; 2004), que de façon limitée, liminaire et dans le cadre particulier de la géographie.

Nous nous limiterons donc à essayer d'apporter quelques réflexions sur ce que peut être la forme en géographie et sur son ontologie « locale ». Nous verrons ainsi comment, en géographie physique, en géomorphologie, compte tenu de divers moments historiques et des cadres scientifiques qui se sont succédés, elle a pu être abordée ; la géomorphologie servant alors de laboratoire physique de la forme en géographie.

Dans cette recherche nous serons amenés à croiser bien des idées de penseurs de différentes époques comme Goethe, d'Arcy Thompson, Prigogine, mais aussi, et peut-être surtout, René Thom (1991 ; 2003) et Benoît Mandelbrot (1967 ; 1975 ; 1977), lesquels, avec bien d'autres qui ont souvent amplifié leurs travaux (PETITOT, 1982 ; NOTTALE, 2011), nous ont donné les outils d'une pensée renouvelée.

La géographie est la science de lieux a écrit Paul Vidal de la Blache (1913) fondateur de la géographie français scolaire après la défaite de 1870. Par lieux il faut entendre, des sites remarquables, des situations exceptionnelles, des morphologies particulières tel que Fernand Maurette, dans son précis de 1923, les décrit à longueur de pages dans un « petit guide », dit l'auteur, qui « s'adresse à l'apprenti géographe » (p. 7), lequel doit comprendre « autant de formes diverses qui dessinent les traits harmonieux et variés de la face de la France » (MAURETTE, 1923, p. 7).

La question de la forme est donc consubstantielle à la géographie, mais son appréhension était (voire reste) largement esthétique. Elle passe par la capacité d'éprouver des sentiments, des sensations, des ressentis... divers et variés ; les géographes, sauf comme cartographes, n'étant pas des créateurs de formes. Ceci est logique dans la mesure où pour reprendre l'expression de Jean Petitot (1982 ; 1989) sévit alors une obstruction galiléenne – que nous avons largement abordée dans nos travaux (MARTIN, 2004) – qui renvoie de fait les questions de forme hors de la science hypothético-déductive.

On voit dès lors toute la difficulté pour le géographe de devoir traiter de formes pour l'essentiel sans en avoir « légalement », scientifiquement le droit. Il fera donc un récit de l'avènement de telle ou telle forme en se plaçant de façon obligée dans une épistémologie chronologique, historique et fort peu

conceptuelle, scientifique. Le raisonnement inductif est alors la base de la réflexion géographique. Il se voit très clairement chez Maurette (1923) lorsque celui-ci rapproche le bâti rural des ressources minérales locales; ainsi émergent une France de la tuile, une France de l'ardoise voire une France de la lauze, etc.

De même bien conscient qu'il faut « expliquer » ces formes Maurette se lance-t-il dans quelques relations et conjectures sur les processus. Et c'est donc avec beaucoup de retenue – en donnant l'impression qu'il brise un tabou – qu'il ose parler de théorie sur huit petites pages (p. 122-130) en intitulant cette partie: « Un peu de théorie. Fleuves de la Méditerranée et fleuves de l'Atlantique ». La théorie est donc de l'hydrologie descriptive (observation des régimes...), donc des remarques sur des flux et surtout pas sur des formes. Les pages suivantes reviennent clairement dans l'orthodoxie géographique puisque l'auteur y traite de « l'âge des cours d'eau » qui « changent de caractère avec l'âge ». Il s'agit alors bien plus de l'âge des vallées que de celui des cours d'eau, pas spécialement de leurs formes, ou alors celles-ci sont assujetties et expliquées par leur âge. Aux vieux fleuves sied les vallées évasées, largement franchissables, écrins de tant de villes en France, etc. ; les frêles et fringants torrents cascading dans autant de gorges infranchissables verrouillées par des goulets.

Comment dès lors lever cette aporie ? Comment faire de la géographie une science alors même que son objet d'étude le plus central – la forme – est non scientifique ? Lever cette aporie nécessite de faire de la forme un objet de science comme un autre et plus une manifestation esthétique. Sur cette voie, rien n'aurait été possible sans la longue lignée des chercheurs biologistes, physiciens, chimistes, mathématiciens... qui ont fondé si ce n'est une science de la forme, du moins une science de la morphogénèse, processus dont les instants sont perçus comme des formes, mais qui les contraignent en partie en retour.

Pour progresser dans ces directions il convient donc de reprendre le projet de la géographie à la racine et d'en fonder l'ontologie. Celle-ci nécessite de repenser l'étendue géographique (longueur, largeur, hauteur) et surtout les rapports scalaires des formes géographiques.

1. Ontologie de la forme

La géographie a comme objet d'étude la quintuple interface terrestre entre l'atmosphère, l'hydrosphère, la lithosphère, la biosphère et l'anthroposphère (noosphère), ce que les géographes appellent l'espace géographique (EG). Cet espace correspond largement à ce que le grand public dénomme le territoire dans la mesure où chaque partie de la Terre est l'objet d'une appropriation, par des groupes humains, par des peuples, dans le cadre de Nations, d'État-nations, d'Empires, etc. Il est donc possible de définir le projet de la géographie (comme

discipline) comme l'étude et la modélisation de l'EG entendu comme le lieu de vie de l'humanité.

L'EG est, en première analyse, un assemblage de formes — que celles-ci soient naturelles ou anthropiques — produit par une dégradation d'énergie (structure dissipative) et, pour partie, causales dans les processus dynamiques (mobilité sur et de l'interface terrestre). L'EG a donc un statut morphologique complexe, ce qui exclut de comprendre les formes par lesquelles il se donne en partie à voir (dimension esthétique), comme une simple apparence passible d'une légère évocation, parfois seulement touristique.

Si l'objet d'étude de la géographie est l'EG, si le projet de la géographie peut se résumer à l'analyse et à la modélisation de l'EG, la géographie se doit, comme toute discipline scientifique, de produire des objets de connaissance qui ne peuvent être de simples observations ou des mises relation voire un récit. L'objectif est donc bien d'arriver à des formulations, hautement conceptuelles comme $E = MC^2$, qui correspondent à des connaissances qui ne peuvent être établies qu'à partir d'une construction théorique enracinée dans le réel et validée par nombre d'expériences négatives qui visent une mise en défaut. Parmi les champs d'étude constituant le projet géographique, la question de la forme tend à relever plus facilement de cet ascétisme scientifique (MARTIN ; FORRIEZ ; NOTTALE, 2012 ; NOTTALE ; MARTIN ; FORRIEZ, 2012 ; FORRIEZ ; MARTIN ; NOTTALE, 2020).

2. Symétrie et géographie : ce qui est géographique et ce qui ne l'est pas

Cet espace, dit géographique, ne l'est que parce qu'il n'est pas (ou très peu) symétrique. En d'autres termes toute forme, toute morphologie, toute différence spatiale qualitative ou quantitative correspond à une brisure de symétrie. Une surface terrestre qui serait aussi lisse qu'une boule de billard serait a-géographique et une planète de ce type ne pourrait voir se développer une géographie, une science géographique. C'est parce que sur Terre ici est différent de là-bas que la géographie existe. Les formes, particulières ici et spécifiques là-bas, sont donc consubstantielles à la définition même de la discipline. Elles sont l'un des signes de sa possible existence et sont donc, pour la géographie, profondément signifiantes.

Dynamiquement cette hétérogénéité doit se constituer comme la surface d'une mer d'huile qui progressivement se couvre de vagues et de déferlantes. D'un état parfaitement symétrique, représenté en géomorphologie par la surface d'aplanissement (SA) qui est topographiquement une plaine, un espace plan où les rivières ne sont pas encaissées, l'évolution produit, par des brisures successives de symétrie, une surface hétérogène constituée de variations, dans

l'étendue, dans l'EG, d'au moins une variable : l'altitude, la nature de la couverture végétale, la couleur des sols... Les limites entre ces attributs, voire la variation dans l'espace de ces variables, cristallisent ce que nous percevons comme une ou des formes, en les rapprochant parfois de morphologies anthropiques : le vase de Sèvre dans les gorges de la Jonte, l'aiguille d'Étretat sur le littoral normand... afin de les désigner, d'en donner une « illustration ». On retrouve ici toute la dimension esthétique de la géographie au deux sens de ce terme : beauté et capacité d'éprouver.

Le projet géographique consiste donc à arriver à comprendre et à modéliser l'hétérogénéité spatiale de la surface de la Terre afin d'en dégager les potentiels, quelles qu'en soient leurs natures (de position, morphologique, liée à des attributs spécifiques...), et cela afin de localiser des ressources à drainer vers un des points de l'établissement humain qui constitue une dimension hautement hétérogène du peuplement de la Terre. De ce point de vue, la mondialisation et la métropolisation n'ont fait qu'amener, à une plus petite échelle au sens géographique, l'aire de chalandise du réseau urbain mondial qui constitue, et constituera, de plus en plus (sauf crise civilisationnelle), l'essentiel de l'établissement des hommes sur Terre.

La géographie doit donc fondamentalement penser des types d'hétérogénéité, l'une naturelle et l'autre anthropique, qui sont perçus de prime abord au travers de formes. La question est donc de savoir de quoi ces formes sont le signe. La géographie doit ainsi d'une part, rechercher quelles peuvent en être les raisons, les logiques et d'autre part, essayer de comprendre comment elles s'articulent afin de mieux vivre sur le seul espace dont nous disposons, et semble-t-il pour longtemps.

L'EG est donc constitué de formes naturelles (une montagne...) et de formes anthropiques (la skyline de la Défense au bout de la grande perspective parisienne...). Ces formes sont le résultat, mais aussi les causes partielles, de processus dynamiques plus ou moins locaux correspondant à des objets (un bassin versant, une ville...) qui peuvent être compris et analysés comme des structures dissipatives au sens d'Ilya Prigogine (1968). Plus simplement les flux d'énergie, de matière et d'information produisent des formes (un réseau hydrographique, une centuriation romaine...) qui en retour modulent les modalités de fonctionnement des objets géographiques (ampleur d'une crue, circulation pendulaire ralentie en début et en fin de journée aux portes des grandes agglomérations...).

Bien que cette dimension physique, thermodynamique, soit essentielle, nous ne l'aborderons pas ici directement. Nous renvoyons le lecteur à l'importante littérature existant sur les phénomènes irréversibles, naturels et anthropiques (RODDIER, 2012 ; 2018). Cela étant ces dynamiques, naturelles ou anthropiques, rapides ou lentes, combinées entre elles ou plus spécifiques

conduisent à créer des originalités locales, bases de l'hétérogénéité globale observées dont les dénominations ancestrales sont nombreuses: pays, terroir, site remarquable, lieu d'exception...

3. Du lieu à la forme

La géographie n'est donc peut-être pas la science des lieux comme l'a pensé Paul Vidal de la Blache (1913 ; 1921) en la réduisant ainsi à une description idiographique dont le Tableau (1903) est la mesure, mais la science des lieux qui font lien et surtout celle de la variation des attributs d'un lieu à l'autre quelle que soit l'échelle de ce que l'on nomme lieu de façon holistique et quelle que soit l'espacement entre les points ainsi appelés lieux.

Cet objet doit donc être étudié dans le cadre d'un projet qui s'initie dans l'idée que les localisations des entités le constituant (localisations par rapport à un référentiel — coordonnées — et/ou relativement les unes par rapport aux autres), quelles qu'elles soient, ne sont pas neutres et donc que ces rapports de position, ces différences de niveau pour un attribut, etc. peuvent être causaux, ou au moins significatifs pour la compréhension de notre espace de vie. Ces lieux qui sont des aires et pas des points, ne sont des pays que parce qu'ils possèdent une cohérence interne liée en partie au nombre et aux types d'attributs présents (la dynamique peut en outre être spécifique), en partie portée par des formes, qui leur donnent parfois un nom : openfield, bocage, karst...

Ces rapports de position doivent être envisagés, tant pour des entités matérielles, que pour des éléments plus abstraits et plus formels entrant dans des structures spatiales et scalaires (gradient, dimension fractale...), lesquelles déterminent les modalités de fonctionnement de l'EG, et sa dynamique. Ces entités, surtout dans leurs acceptions matérielles, se déclinent scalairement, mais de façon discrète (saut d'échelle en échelle) comme l'indique clairement le vocabulaire, de la petite échelle au sens géographique à la grande : réseau urbain, agglomération, ville, quartier, bloc, bâtiment... Il convient donc de considérer des rapports de position à une même échelle (tel quartier par rapport à tel quartier de telle ville ou de telles villes), mais aussi des rapports scalaires : telle(s) entité(s) à petite échelle par rapport à telle(s) autre(s) à plus grande échelle, la ville par rapport au quartier par exemple, et inversement.

4. Ontologie des lieux et des formes fondée sur leurs dimensions scalaires

Certaines entités sont envisageables en elles-mêmes (un cap, une crique, une ville...), car fortement prégnantes dans la perception humaine, alors que d'autres sont conceptuellement dépendantes d'autres formes ou d'autres

éléments constitutifs d'une forme. Un plateau, en théorie, ne peut être pensé sans une vallée encaissée par exemple. De même il ne peut y avoir de forme sans bord, mais la limite de la ville est une inconnue qui ne limite que très peu la réflexion sur l'entité. Ce bord est aussi une limite interne du fond. Ainsi ne peut-il être pensé une forme sans son fond dans la mesure où celle-ci est localement son complément spatial et perceptif, comme l'atmosphère bleue, certains jours, autour d'un sommet alpin.

Il convient donc de penser les rapports d'entités manifestement séparées, car probablement ontologiquement séparables (mais peu de réflexions abordent l'ontologie des entités géographiques par trop évidentes), ce qu'en géographie fait l'analyse spatiale, et de penser la relative séparation d'entités appareillées, ce que propose, dans le cas des formes, une analyse morphologique (versants et vallée, vallée et plateau, etc.). Il faut donc considérer deux problèmes : -1- ne pas séparer différents éléments qui sont concourants à la définition ou perception d'une forme et fonctionnellement liés, mais sans devoir penser un tout dans une approche tellement holiste qu'elle en devient inopérante (c'est tout le problème du découpage de l'EG sur une base morphologique et fonctionnelle), et -2- tout séparer jusqu'à arriver à une pulvérisation maximale de la réalité qui conduit aux affres de l'incompréhension dans la mesure où cette descente scalaire, cette réduction maximale vers l'infiniment petit, perd totalement de vue tout rapport perceptif avec les objets géographiques, avec l'entité, avec le lieu, etc. qui restent les points d'ancrages habituels du géographe, comme le montre et le démontre son vocabulaire. Que sont, en géographie, un point (sur la carte) ou un site (remarquable) si ce n'est respectivement des entités d'échelle moyenne, de petites aires. La très grande échelle en géographie classique n'existe pas ou très peu: *quid* du cristal de quartz du bloc de granite du géomorphologue qui doit aussi raisonner en homme d'une autre science, bien plus formelle.

Si la petite échelle est rassurante — c'est celle de la Terre elle-même, celle de notre planète bleue que nous ont fait découvrir les cosmonautes, les astronautes et autres spationautes — la grande échelle, elle, est angoissante, car elle n'est en rien à notre mesure, même si nous sommes constitués (comment ?) des entités ou des structures qu'elle décrit. Si nous pouvons nous projeter, nous mouvoir, tel un avion dans le ciel, dans un vaste espace appréhendé à petite échelle, rien de tel n'est possible avec le monde cellulaire par exemple que nous ne pouvons que contempler. Jamais nous ne pourrions y pénétrer. Sa signification est donc tout autre. Notre capacité d'éprouver y est largement amputée.

L'échelle de notre taille forme comme une barrière. Au-delà vers les plus petites échelles, nous avons une capacité esthétique pleine et entière, une possibilité d'éprouver une relation à ce grand monde, voire de nous y perdre comme dans la grande bleue du Grand bleu ; en deçà ce rapport esthétique est très largement limité. Seule une contemplation, et encore souvent grâce au

truchement d'outils spécifiques (loupe, microscope...), nous est accessible. Il faut le cinéma pour nous le faire entrevoir (*Microcosmos, Arthur et les minimoyes*, 2006). La révolution de l'infiniment petit en biologie a été à ce prix et fort tardive.

Si, *a fortiori* il convient de faire une randonnée continue dans les échelles de la plus petite à la plus grande, plus que son inverse, de la plus grande à la plus petite qui est perçue comme étant intrinsèquement constructiviste, ce qui est exact du point de vue de l'évolution, alors l'angoisse s'accroît au fur et à mesure que le sens empirique, pratique, existentiel, etc. se perd. Ceci explique grandement que les rapports scalaires en géographie soient globalement limités entre ce que les échelles au dix millième et au millionième donnent à voir sur un document papier (GALLOUÉDEC ; MAURETTE ; MARTIN, 1926; MARTIN ; FORRIEZ ; NOTTALE, 2012 ; FORRIEZ ; MARTIN ; NOTTALE, 2020).

Toutefois, l'introduction d'une codification numérique de l'EG, comme avec Google Earth, modifie profondément cette limite en autorisant de vivre une plongée scalaire de la plus petite échelle, celle de la Terre, à la plus grande, celle de quelques pixels dans un lieu recherché. La variation de l'information dans l'ordre des échelles défile alors sous nos yeux sans que nous puissions ainsi mesurer le taux de cette variation et donc établir une ou des dimensions fractales qui structurent cet aspect de l'EG. Il faudra pour cela des protocoles spéciaux.

L'œil et le cerveau n'ont guère la capacité d'évaluer cette dimension du monde, alors que bien des personnes peuvent reconnaître un angle droit. Dans ce dernier cas la géométrie sous-jacente est euclidienne et pratiquée par l'humanité depuis des millénaires, alors que dans l'autre, elle est non euclidienne et de construction récente. L'incapacité, plutôt générale de percevoir la structuration en échelles de l'EG et de ses formes, limite donc beaucoup la compréhension de ce que ces formes sont le signe.

Nous verrons ci-dessous que s'il est possible et souhaitable de réfléchir en échelles, par niveaux, donc de façon discrète (méthode classiquement géographique en fonction des échelles cartographiques), il est aussi fort important de réfléchir le continuum scalaire, la variation (voire sa variation) du taux d'information mesurable entre échelles, ce qui correspond à une dimension fractale, laquelle peut ne pas être constante et varier entre les échelles (situation de covariance d'échelle).

5. Géographie théorique et espace géographique formel

De telles approches construisent une géographie théorique (et quantitative; les mesures réalisées servant à confirmer ou infirmer les hypothèses établies à partir du cadre théorique) et définissent une méthode qui permet, progressivement, de limiter le récit comment moyen principal (et dans certaines études, unique) de compréhension de l'EG.

Il s'agit donc d'approfondir la réflexion géographique à partir d'un travail conceptuel et méthodologique prenant appui sur l'objet d'étude essentiel de la géographie qu'est l'EG consubstantiel à ses formes. Ce dernier étant thématiquement multiple, il ne peut être abordé initialement dans sa globalité. Un axe particulier de travail doit donc être déterminé et il doit l'être en fonction de ses caractéristiques les plus importantes.

Or cette interface est avant toutes choses un ensemble, un assemblage spatial et scalaire de formes que l'étude de rapports de position (têtes de bassin *vs* gorge aval, centre *vs* périphérie...), de rapports scalaires (bassin versant *vs* versants, quartier *vs* ville...), de rapports énergétiques (stockage de néguentropie *vs* exportation d'entropie) et de rapports esthétiques (capacité d'éprouver *vs* émergence du sens) peut caractériser.

Pour se faire il faut rechercher l'essence de ces entités que sont les formes et en déterminer les lois physiques, ce qui revient à dire que l'objet d'étude de la géographie, plus que la forme elle-même, ou l'assemblage de formes, est la morphogénèse (naturelle et anthropique) de l'interface terrestre (mis en forme) sans laquelle l'humanité ne peut exister, ni aucun de ses niveaux territoriaux et politiques, sans même devoir parler des frontières naturelles. Cette morphogénèse produit des ruptures de symétrie qui se traduisent par une hétérogénéité de et dans notre espace de vie dont les géographes sont comptables. La forme nous apparaît donc que parce que les dynamiques morphologiques et les dynamiques anthropologiques ne sont pas à la même échelle de temps. C'est un peu la même chose qu'avec le rapport entre l'histoire et la géographie. Cette dernière campe une scène immuable dans laquelle les acteurs historiques jouent leur partition. Mais ceci n'est vrai que si la jauge du temps est l'échelle de la durée d'une vie, d'un régime ou d'une civilisation. Si la jauge du temps est géologique, tout change. La scène devient mobile et les acteurs imperceptibles, floutés par la succession des millénaires.

Si la durée de vie d'un humain n'était pas de l'ordre d'un siècle, mais d'un million d'années, alors tous les paysages apparemment aujourd'hui immobiles seraient perçus comme particulièrement dynamiques. Ils apparaîtraient se transformant, s'élevant, s'érodant, fondant comme une glace italienne, en été, sous le soleil. Les océans des quarantièmes rugissants des cinquantièmes hurlants peuvent donner une image de ce renversement de logique. La surface de la mer n'y est que mobilité à notre échelle de temps.

La forme n'est donc qu'un instantané fort précaire, qu'un arrêt sur image lié à la durée de notre vie, qui nous fait percevoir comme un instantané immuable, sauf situation exceptionnelle : glissement, écroulement, effondrement..., ce qui est au fond que très fugace. Il revient donc aux reconstitutions géomorphologiques, et plus largement géographiques, de replacer ces

cristallisations apparentes dans un continuum scientifiquement bien plus fondamental.

Cela étant, il est clair que les lois constitutives de l'espace théorique paramétrant l'EG nous sont très largement inconnues et donc que nous ne pouvons envisager aucun prolongement analytique à déployer à partir d'un faisceau de formalisations et qui pourrait constituer une théorie de l'EG. La démarche scientifique ne peut donc guère se construire en partant de conceptions abstraites (l'espace-temps einsteinien en cosmologie par exemple) afin d'aller vers des réalisations pratiques ou des compréhensions de situations expérimentales. La démarche doit donc beaucoup emprunter à ce qui est observable afin de l'introduire dans une construction conceptuelle de plus en plus poussée, précise et raffinée.

Toutefois, cet axe de recherche peut s'appuyer sur les travaux d'écoles de la forme (gestaltisme, sémiophysique...), et sur ceux de René Thom (1991 ; 2003). Mais dans la mesure où les rapports scalaires ont une dimension causale dans la fonctionnalité de l'EG, et qu'ils ne sont pas seulement une technique géographique d'analyse d'un territoire à partir de cartes à différentes échelles, il convient de les caractériser formellement, ce qui implique de s'appuyer sur les travaux de Benoît Mandelbrot (1975 ; 1977), mais aussi de Laurent Nottale (2011) qui a pensé (et théorisé) l'« accélération d'échelle » comme la dérivée de la variation de la dimension fractale (en fonction des échelles) dans le cadre de la relativité d'échelle, ce qui correspond à une variation de la variation de l'information dans l'ordre des échelles, ce dont nous donnerons un exemple ci-dessous.

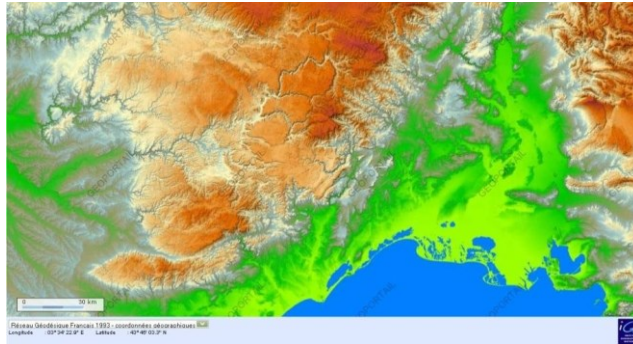
Dans de tels cas, fréquents en géographie, il faut donc mettre en œuvre un troisième niveau d'analyse ou de réflexion (-1- longueur, -2- dimension fractale et -3- accélération d'échelle) pour arriver à dégager un invariant, ce qui indique bien, d'une part la complexité de l'EG, mais aussi, et surtout, d'autre part, une voie méthodologique, relevant des sciences les plus formelles, nécessaires pour l'étude de l'EG. Bien évidemment ces structures scalaires, aujourd'hui établies comme ubiquistes, doivent avoir un sens, probablement profond, au-delà de la grammaire des paysages.

6. La cote 450 m

Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) avec un pas de 50 m (soit une valeur d'altitude tous les 50 m et selon deux directions orthogonales formant une grille carrée) étant disponible à l'Institut Géographique National (IGN) de France, il devient possible de construire une visualisation d'une partie du relief national — le sud-est du Massif central et la basse vallée du Rhône, lequel se

jette dans la Méditerranée (Fig. 1) — et d'en extraire une courbe de niveau — la courbe 450 m sur la figure 2 — qui s'étend ici du seuil de Naurouze à l'Ardèche.

Figure 1 : Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la basse vallée du Rhône et du Languedoc Roussillon (Données IGN, pas 50 m).

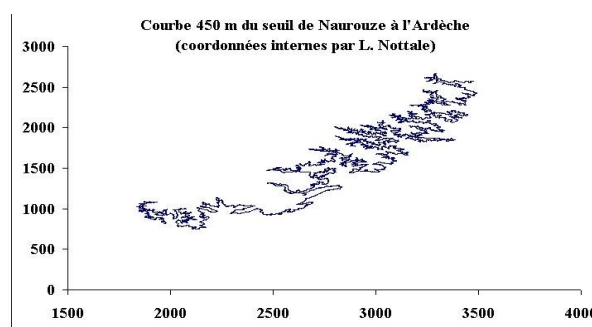


Source : Données IGN, pas 50 m.

Ces limites sont choisies pour des raisons hydrogéomorphologiques. Cette limite sud-est du Massif central subit une glyptogénèse intense lors d'épisodes dits cévenols qui ne sont pas de même nature dans le bassin de la Garonne, au-delà du seuil de Naurouze, et au nord de l'Ardèche (Monts du Lyonnais). L'intensité de cette érosion linéaire (au niveau des talwegs) produit des formes spécifiques, mono génétiques, dont rendent compte particulièrement les courbes de niveau de mi-hauteur du rebord du Massif central.

Ces données peuvent ensuite être traitées par une méthode assez classique de calcul de la dimension fractale (box counting...). On obtient alors une information qui varie en fonction de l'échelle. Ce qui est généralement représenté par un graphique bilog, l'axe vertical portant le niveau de l'information et l'axe horizontal les échelles.

Figure 2 : Courbe de niveau 450 m.

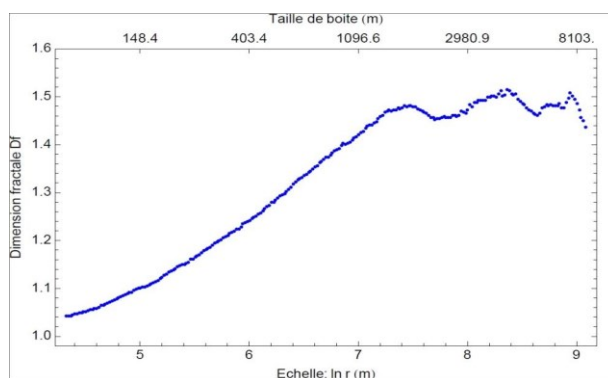


Source : extraite du MNT.

Dans un tel graphique les points s'alignent, rarement selon un seul segment de droite, ce qui correspondrait à l'existence d'une seule dimension fractale (situation d'invariance d'échelle dans laquelle les motifs répétés à différentes échelles sont statistiquement similaires, ce qui implique une participation non négligeable du hasard dans la construction de la forme), entre les deux échelles limites (liée au pas de mesure d'une part, et à la taille de la fenêtre considérée d'autre part). Cette situation est assez classiquement celle des entités fractales théoriques comme le tapis de Sierpinsky ou l'éponge de Menger, lesquelles sont en outre auto similaires (reproduction des mêmes motifs à différentes échelles, donc sans introduction du hasard). Parfois on obtient deux segments, ce qui correspond à deux dimensions fractales articulées autour d'une échelle de coupure et assez souvent une courbure générale, ce qui correspond à une multitude de dimensions fractales (FORRIEZ ; MARTIN ; NOTTALE, 2020). Cette situation est celle de la covariance d'échelle. La dimension fractale varie en fonction de la variation de l'échelle ; elle n'est donc plus constante. Pour en rendre compte il faut dériver la fonction reliant l'échelle à l'information.

Ainsi pour rendre compte de cette multitude de dimensions il convient de calculer ces dimensions fractales scalairement locales, d'échelle en échelle, ce qui revient à dériver la courbe présentée classiquement dans un graphique bilog. C'est ce que nous avons sur la figure 3. L'axe vertical en coordonnées arithmétiques correspond aux dimensions fractales scalairement locales, alors que l'axe horizontal, toujours en logarithme, correspond aux échelles. Leurs correspondances en termes de tailles sont données au niveau de l'axe supérieur.

Figure 3 : Variation de la dimension fractale en fonction des échelles.



Source : Philippe Martin.

L'alignement des points montre bien une variation scalairement locale de la dimension fractale. Celle-ci est grossièrement concave, puis se stabilise dans une oscillation autour d'une dimension fractale voisine de 1,5 (échelles entre $\ln(7,4) \approx 1600$ m et $\ln(9) \approx 7900$ m). En d'autres termes, à ces petites échelles,

la surface proche de la courbe de niveau de 450 m correspond à une surface brownienne (dont une coupe a une dimension fractale de 1,5), c'est-à-dire à une surface aléatoire $DF = 2,5$). À ces petites échelles, nous sommes en situation d'invariance d'échelle (aux oscillations près), ce qui correspond à une dimension fractale constante.

Si l'on procède à une plongée dans les échelles, donc en allant par exemple de $\ln(7,4)$ à $\ln(4)$ sur le graphique, il apparaît très clairement que la dimension fractale scalairement locale, diminue assez régulièrement de 1,5 à 1,05. Nous sommes donc en situation de covariance d'échelle et retrouvons ce que Laurent Nottale (2011) a appelé : accélération d'échelle, en reprenant le schéma classique de la physique dans lequel l'accélération est la dérivée de la vitesse.

La partie en bas à gauche (échelle $\ln(4,2)$) présente en outre une inflexion qui semble indiquer que les dimensions atteindraient des valeurs très proches de 1 pour de très grandes échelles, ce qui est logique. Le calcul ne peut ici être poussé jusqu'à ces très grandes échelles métriques en raison du pas du MNT utilisé. Celui-ci est à 50 m et donc le résultat le plus fin ne peut être déterminé que pour deux fois ce pas soit 100 m. Avec un MNT Lidars par exemple doté d'un pas de dix centimètres, cette hypothèse pourrait être vérifiée. Elle l'a été ailleurs sur de petits bassins en Cévennes.

Mais déjà à ce niveau scalaire la courbe de niveau d'altitude 450 m n'est presque plus fractale. Elle est sub euclidienne. Qu'est-ce à dire ? Cela signifie que très localement, par exemple à l'échelle du mètre carré, la courbe de niveau ne présente plus d'irrégularités, car l'irrégularité majeure ici modélisée dépend de la glyptogénèse ; c'est-à-dire de l'érosion linéaire réalisée par les cours d'eau. Or pour que les ruisseaux commencent à creuser une surface, il est impératif qu'ils soient bien alimentés en eau. Pour qu'ils le soient, il faut une surface de concentration de l'eau de pluie. En fonction des pluies régionales (et des terrains : infiltrations...) cette surface sera plus ou moins grande, mais généralement de plusieurs centaines de mètres carrés. En d'autres termes, le processus morphogénétique principal de l'irrégularité des reliefs n'a quasiment aucune action de différenciation topographique aux très grandes échelles, donc la courbe de niveau est quasiment lisse. L'irrégularité pouvant exister à ces niveaux scalaires qui sont largement ceux de notre perception dépendent d'autres processus morphologiques comme l'érosion différentielle (mise en saillie de roches ou de faciès plus résistants), etc. Mais ce niveau scalaire est celui de notre échelle principale de perception, ce qui biaise notre compréhension par une approche esthétique du monde qui nous entoure.

En d'autres termes, notre principale capacité de perception s'échelonne entre l'échelle du mètre à nos pieds ($\ln(0) = 1$ m) et celle de quelques centaines de mètres, suivant les points de vue (soit entre $\ln(4) \approx 55$ m et $\ln(5) \approx 150$ m). Seule une vision aérienne, d'où son intérêt, ou une reconstruction numérique

comme la figure 1, permet de prendre conscience des morphologies à plus petite échelle. Mais encore faut-il savoir lire l'irrégularité des formes pour leur donner un sens physique. C'est encore le travail spécialisé des géomorphologues et autres géographes.

Cet exemple montre toutefois la richesse et la complexité de l'information scalaire qui est contenue dans un trait aussi simple qu'une courbe de niveau. Pour réellement parler de forme (au sens perceptif) il faudrait pousser l'analyse et prendre plusieurs courbes, et travailler en 3D. Cela étant cette information, très limitée sur la forme du talus qui limite le sud-est du Massif central, montre que l'invariant qui la caractérise n'est pas sa longueur, ni même sa dimension fractale, mais la variation de celle-ci dans l'ordre des échelles. Une telle structuration n'est évidemment pas aléatoire et doit nécessairement être expliquée, ce qui dépasse largement l'objet de ce texte. On peut toutefois avancer quelques éléments d'explication et de compréhension de cette dimension essentielle du monde, de l'EG.

7. Formes et processus inverse

Cette réflexion peut ainsi se déployer à partir d'une question qui est de savoir si la forme est une projection perceptible de structures fondamentales du monde ou si elle est une projection sur l'EG d'un besoin anthropologique d'ordre, de hiérarchie à l'instar de ce que peut être l'Âme dans le système d'Aristote, une sorte de programme, de nécessité, de finalité, etc. découlant d'une hypothèse fondamentale rassurante : l'EG, la Terre, le Cosmos ne peuvent pas être seulement les produits aléatoires d'un chaos originel!

Pour trancher cette question, la démarche du géographe (et de bien d'autres chercheurs attachés à la compréhension des formes) doit donc consister à remonter, selon une logique abductive, des observations possibles — celles des formes et des fonctionnements, conjoints ou disjoints dans le temps, et dans l'espace — à des structures plus abstraites, à des règles ou lois qui président aux modalités d'organisation de l'assemblage morphologique, que les géographes ne peuvent que définir que comme leur objet d'étude factuel.

Cela revient donc à s'affronter à la compréhension d'un processus inverse, mais déployé à l'échelle de la surface terrestre et sous contraintes multifactorielles. Pour échapper au seul cadre descriptif et pour ne pas tomber dans l'ornière de l'opinion propre à telle ou telle école, il convient de se donner le cadre le plus formel possible et de déployer un appareillage analytique le plus adapté possible, car reposant sur une compréhension inductive de l'essence des formes tout autant que sur une observation déductive de la morphogenèse, ce qui est, nous le verrons ci-dessous, en partie réalisé dans des approches de géomorphologie dynamique.

Il y aurait donc deux processus inverses à construire : d'une part, celui qui conduit du fonctionnement observable, mesurable et tangible du monde à la forme observable perçue, perceptible ; et d'autre part celui qui conduit de la forme elle-même conçue comme holiste, géométriquement caractérisable, perçue et perceptible, facteur causal du fonctionnement, à des structures plus fondamentales du monde, lesquelles pourraient être conçues comme des lois, si l'espace-temps qui les caractérise peut être décrit, et à défaut comme des attracteurs très vraisemblablement étranges et/ou plus ou moins fractals, si tel n'est pas le cas.

Ces derniers ne sont alors que des descriptions structurelles, au travers d'un nombre de dimensions (variables) et d'une topologie plus ou moins complexe, des états possibles du système dynamique dont ils rendent compte ; certains de ces états étant stables (du moins un temps), d'autres étant instables, c'est-à-dire traversés très rapidement à l'échelle de temps qui est la nôtre. On retrouve donc là les catastrophes de la théorie de René Thom (1991 ; 2003) ; ces dernières étant des attracteurs, mais trop simples pour prendre en compte la fractalité souvent observée. C'est toute la question de la stabilité structurelle qui a limité le développement de la théorie des catastrophes.

Par ailleurs avec une telle description aucun prolongement analytique n'est possible, donc aucune prévision n'est envisageable. Ces attracteurs ne sont donc que des descriptions, certes utiles, mais dont il n'est guère possible de savoir si ce ne sont que des artéfacts ou les prémisses d'autres choses. En d'autres termes ils renseignent très peu sur la question de savoir s'ils existent des lois de la morphogenèse et si oui, sur ce qu'elles pourraient être.

La répétitivité des formes, comme toute répétitivité en science, laisse penser qu'il existe un mécanisme produisant et contrôlant telle ou telle morphogenèse et donc morphologie, mais rien ne permet à ce stade de dire, pour l'EG, que la part du hasard dans ce mécanisme n'est pas majeure. Faire une telle hypothèse est même nécessaire dans la construction de la réflexion à produire.

8. Morphogenèse différentielle vs morphogenèse uniformisante

La forme elle-même, dans sa quintessence, si elle est aboutie, comme morphologie issue d'un fonctionnement long et achevé, peut aussi se comprendre comme un attracteur local et typique marquant un lieu et produisant donc de l'hétérogénéité relativement stabilisée à la surface de la Terre, ou de l'EG.

Ceci correspond à une vieille notion de géomorphologie (BAULIG, 1950). « Quand un corps est soumis à des causes qui changent graduellement sa forme, la figure qui résistera le mieux à ces changements est précisément celle que ces changements finissent par produire ». En d'autres termes, le travail effectué sur la forme par les flux ou les réactions qui l'établissent est de plus en plus faible au

fil du temps dans des conditions stables. La forme est donc progressivement de plus en plus « parfaite » (optimale), c'est-à-dire adaptée aux processus qui la produisent.

Ceci nécessite un régime morphogénétique stable aux échelles géologiques de temps, ce qui est rarement le cas, sauf pour les processus les plus rapides par exemple dans le sable, la glace, le sel gemme ou les argiles. Le cas général est donc, en fonction des variations spatiales des faciès et des changements de dynamiques externes, un mélange plus ou moins lisible de résultats de processus variables plus ou moins achevés et/ou effacés (paléformes relictuelles...). Une très large partie de la complexité morphologique de l'EG est liée à ces phénomènes.

De façon absolue en géomorphologie, la forme « parfaite » (optimale) et donc stable dans le temps correspond à la surface d'aplanissement (arasement des reliefs) qui se traduit dans le paysage par une plaine dont les vastes espaces africains, nord-américains ou russes donnent une idée. Il s'agit donc là de portions de l'EG, d'aires limitées, mais correspondant à ce que pourrait être la Terre au bout de quelques centaines de millions d'années si la tectonique des plaques (liée à l'énergie nucléaire produite dans la graine au centre de la Terre) ne venait pas, en permanence, modifier les conditions énergétiques d'une partie de ces territoires (orogénèse). Une Terre a-géographique serait donc, de ce point de vue, une vaste plaine, au moins sur l'ensemble des continents. Ceci donne donc un point de fuite théorique, un aboutissement possible de l'évolution géomorphologique ou un état zéro à partir duquel peut se déployer une morphogénèse différentielle qui produit des formes différenciées. Cet état aplani est conceptuellement, mais aussi empiriquement, le seul point de référence de toute dynamique géomorphologique, la seule morphologie à laquelle référer toutes les évolutions, toutes les transformations. De ce point de vue la géomorphologie est entièrement relativiste et rend compte d'écarts à cette situation.

Sur cette base il est alors possible de penser que des formes, certes fugaces au regard de l'évolution longue envisagée ci-dessus, puissent s'établir localement, sous tel ou tel processus, et atteindre des morphologies qui soient globalement parfaites, c'est-à-dire optimale au regard des flux qui les ont produites. Le meilleur exemple, à notre échelle de temps, est peut-être celui des dunes, des barkhanes ou autres formes qui se reproduisent continuellement. Si le sable est en permanence remplacé, la forme elle se maintient ; elle est donc stable, « parfaite ». Les méandres (qui correspondent à des courbes de flambage) sont probablement aussi de cet ordre dans la mesure où on les retrouve dans bien des situations géomorphologiques (bédières sur les glaciers alpins, trains de méandres de fleuves...).

On aurait donc là des systèmes morphologiques différenciant (produisant des différences spatiales) achevés, mais locaux dont la conceptualisation fondamentale n'est pas évidente. Certes d'un côté ils contribuent à produire un aplanissement généralisé, et en cela ils constituent des états temporairement stables, métastables traduisant une dynamique morphogénétique forte. Mais d'un autre côté ils produisent des formes qui semblent être la preuve d'une différenciation toujours accrue de l'EG. Il y a donc là une dissonance entre ce que produisent ces systèmes morphogénétiques (globalement une accélération de la morphogenèse) et la perception que nous avons des formes produites qui semblent immuables, éternelles, donc qui exclut d'une certaine façon toute morphogenèse.

Ces formes renvoient à des attracteurs particuliers, lesquels se déploient et se forment sous l'injection d'énergie, puis se déforment, se transforment, pour finalement fusionner et se contracter lorsque le niveau énergétique diminue pour, au total, en théorie, atteindre la configuration d'un point (cf. l'attracteur du balancier d'une pendule qui passe d'un cercle à un point lorsque toute l'énergie est consommée, puis d'un point à un cercle lorsque l'on remonte les poids et relance le mécanisme).

Ainsi dans le domaine de l'EG, à partir d'un certain niveau de dégradation énergétique, d'intensité de la morphogenèse qui se traduit dans des formes « parfaites » et que l'approche fractale peut caractériser (niveau maximal d'érosion), le système morphogénétique entre inévitablement (par exemple au travers d'une diminution du mécanisme orogénique) dans une phase de progressive uniformisation de la forme, donc d'intensité morphogénétique décroissante, jusqu'à produire, de plus en plus lentement, une surface d'aplanissement. Il y a donc progressivement une réduction du potentiel énergétique et donc morphogénétique. Ceci boucle un cycle thermodynamique et morphogénétique.

L'EG est donc constitué de cette foultitude de formes renvoyant à des systèmes morphodynamiques particuliers situés à des niveaux de perfection (ou d'optimalité) fort variables. En plus de l'hétérogénéité spatiale, nous avons donc une grande hétérogénéité dans le niveau de « perfection » atteint ici ou là par tel ou tel système morphogénétique.

Une même logique peut être envisagée pour les réalisations anthropiques. Dans ce cas, l'établissement humain stable est celui correspondant à une distribution plus ou moins aléatoire de la population (FORRIEZ, 2010), localement groupée en villages, en petites communautés — ce qui assure une meilleure survie — et contrôlant un territoire de taille limitée, mais dont la surface est en relation avec la productivité écologique locale (végétale, animale), donc avec le flux solaire et la présence d'eau ; la répartition des villages permettant de minimiser les distances à parcourir et isolant plus ou moins les

groupes vivant ainsi globalement en autonomie, sauf échanges à petite échelle (produits artisanaux, mariages, guerres...). C'est la France des villages, des hameaux et des fermes, le vieux fond des oppida, des *Villae* et des mottes castrales.

Toute forme, toute organisation spatiale qui s'écarte plus ou moins de ce schéma est donc dans une situation instable ou au mieux métastable. La ville dont les formes se répètent depuis des millénaires pourrait être ainsi considérée comme métastable. Quand elle est poussée au niveau d'une métropole de plusieurs dizaines de millions d'habitants, on peut se poser légitimement la question de sa résilience.

Rien ne permet d'écarter, *a priori*, une crise morphogénétique, catastrophique, aux deux sens du terme (TC et effondrement) si par exemple les flux d'énergie, de matière et d'information qui les traversent venaient à baisser, voire à disparaître, au moins pour certains. Il s'agit donc d'une stabilité dynamique (comme en vélo), et pas d'une stabilité structurelle (la configuration spatiale momentanément la plus parfaite possible, ce que nous trouvons généralement beau).

Mais comme pour les formes naturelles, ces morphologies sont le produit de systèmes morphogénétiques qui accélèrent le retour à un état énergétiquement, thermodynamiquement stable et donc qui accroissent la dissipation globale d'énergie. Ces derniers siècles leur constitution et leur maintien n'ont été possibles que parce que l'on est passé du bois au charbon, du charbon au pétrole et du pétrole à la fission nucléaire. Leur préservation passe donc par la réponse à une question simple : quelle énergie encore plus massive doit être mise en œuvre après et au-delà de la fission nucléaire ?

Si cette question, dans les décennies à venir, ne trouve pas de réponse satisfaisante, nous passerons alors d'une morphogenèse différenciante à une morphogénèse uniformisante, c'est-à-dire à une phase de déstructuration, de fragmentation, de disparition progressive... de ces immenses structures urbaines comme Rome a pu le vivre. Apparaîtront alors des espaces ruinés et on visitera peut-être un jour les ruines de Paris comme on visite aujourd'hui celles de Babylone.

L'un des objectifs vitaux de la géographie est donc de donner une description analytique de cette double démarche abductive, de ce double processus inverse. Cela étant le statut ontologique de la forme ne semble pas devoir être entièrement tranché par cette remontée des conséquences aux causes. Il existe derrière ces problèmes une dimension métaphysique non négligeable.

9. Formes et projections de structures et/ou de conceptions anthropologiques?

Le travail de perception de la forme peut être compris comme le voilement et le dévoilement du réel. D'une certaine façon la forme vient recouvrir ce qu'une réduction analytique devrait pouvoir caractériser, mais fournit aussi une (première ?) grille de lecture du monde. Différencier une gazelle d'un lion dans une savane il y a un million d'années, semble avoir pu être une compétence majeure pour survivre. L'essence même de la forme, sa logique profonde, semble alors particulièrement secondaire. C'est un indicateur utile, pas une question de philosophie ni un objet scientifique. Très largement en géographie c'est encore ce niveau d'analyse qui prévaut. Le géomorphologue reconnaît un lapié, un horn, une plage... tout comme d'autres reconnaîtront une ferme à cour carrée, une rue, un château... Mais, si on essaye de dépasser ce niveau perspectif et descriptif, si on tente de soulever la question de l'ontologie de la forme, de son essence profonde, cela conduit à penser une réduction analytique largement scalaire envisagée ci-dessus qui produit son évanescence; un peu comme la déchosification de la matière produite par la physique quantique et évoquée par Bernard d'Espagnat (1998). Où se situe la réalité ?

La perception de la forme conduit à prendre comme réalité matérielle des configurations spatiales identifiées que dans une large mesure l'approche fractale ne retrouve pas, et inversement à introduire une caractérisation matérielle de la forme comme élément causal du fonctionnement que l'observation semble valider. Il suffit pour cela d'avoir vu la formation d'une crue majeure, par exemple en Cévennes (épisodes cévenols et gardonnades), durant laquelle les versants ruissellent de toute part alors que le talweg bouillonne sous l'effet de l'écoulement puissant d'une lave froide, d'eaux mélangées de limons, de sables, de blocs... pour percevoir le lien causal entre le fonctionnement et la forme, ce qu'essaye d'aborder la géomorphologie dynamique à nos échelles de temps. Mais est-ce là tout le problème ?

Une nouvelle aporie apparaît donc : comment la forme ne peut-elle ne pas être révélée dans une approche fractale alors qu'elle serait causale selon une démarche fonctionnaliste et issue de ce fonctionnement ? En d'autres termes, que caractérise la fractalité avérée ? Cette aporie est généralement masquée par la certitude de la perception, tout comme les quatre éléments aristotéliens : l'eau, la terre, le feu et l'air semblaient couler de source, et par notre incapacité naturelle à évaluer les structures fractales. Ces phénomènes perceptivement irrécusables, il a fallu les dépasser pour développer une chimie analytique. On peut donc penser que la forme doit être envisagée comme un concept prospectif dont le dépassement, ou au moins le perfectionnement, devient plus que nécessaire.

Certains aspects de cette question avaient déjà été soulevés par René Thom (1980) lorsqu'il écrit sur « la morphogenèse comparée d'un œuf et d'un escarpement » (MARTIN, 2003b, p. 161-162). « Considérons en premier lieu un œuf de grenouille, fécondé [...], en consultant les traités d'Embryologie, nous serons en mesure de prédire [...] toute la morphologie de son développement. Considérons d'autre part une falaise mise à nu à une date déterminée t_0 par un glissement de terrain ; supposons connus la nature géologique de cette falaise, et tout le microclimat local ultérieur (vents, pluies, températures, etc.). Peut-on prévoir la forme que prendra ultérieurement la falaise sous l'action des agents érosifs ? » La réponse est évidemment négative et aucun traité classique n'expose même une ébauche de solution de ce problème ; constat auquel arrive aussi René Thom, mais en soulevant, en outre, le paradoxe des situations et l'incohérence qu'il y a, en géomorphologie, à continuer à croire que nous atteindrons une modélisation de la morphogenèse en suivant seulement la voie de l'étude combinée des agents. « Dans le cas 2, notre connaissance du substrat et des forces agissantes est excellente ; néanmoins, bien malin serait le géomorphologue qui pourrait prédire avec quelque précision la forme sculptée dans la falaise par l'érosion. Dans le premier cas, nos possibilités de prévision sont très bonnes ; et cependant, notre connaissance du substrat et des mécanismes morphogénétiques [...] est des plus lacunaires. En morphogenèse, il n'y a donc qu'un rapport très distant entre nos possibilités de prévision d'une part, et notre connaissance du substrat d'autre part » (THOM, 1980, p. 11).

Pour la géomorphologie, le doute sur la possibilité d'atteindre une description formalisée, puis une modélisation de la morphogenèse à partir de la mesure et de la combinaison de facteurs, d'agents d'érosion, n'est pas récent. Citons par exemple les remarques de Henri Baulig « Les processus élémentaires sont infiniment complexes et enchevêtrés ; les formes d'équilibre résultantes sont simples et harmonieuses, et l'on ne voit pas bien comment se fait le passage. [...] les processus de détail d'une part, les formes d'ensemble de l'autre, se situent-ils sur deux plans différents de la réalité physique, de telle sorte que la connaissance des processus ne livrerait pas la loi des formes ? » (1950, p. 43).

Nous sommes donc dans une phase comparable à celle où Tycho Brahe mesurait la position d'étoiles célestes, constituant un catalogue dont l'ordre profond n'apparaîtra qu'avec les lois de Kepler. Les publications, les banques de données sont aujourd'hui pleines de mesures géomorphologiques, et géographiques, dont la relation à la forme est des plus incertaine. Il manque clairement un cadre théorique et probablement de penser différemment l'idée même de forme.

Telle est une des grandes difficultés à laquelle une physique de la géographie devra se confronter et résoudre. Ceci implique évidemment de définir une physique de la géographie (travail en cours) et en premier lieu, pour la

géographie dans son ensemble, de sortir d'un existentialisme moral (ou amoral ?) qui après avoir déconstruit les fondements de la Vérité, particulièrement chrétienne, et avoir rendu tout relatif dans une négation de l'humanisme kantien au cours du XX^e siècle voit l'historicité, sur lequel il est fondé, de plus en plus contesté par une baisse continue de la productivité (BLOOM *et al.*, 2020). Ceci pour indiquer au passage que la remise en cause devra être large et très profonde et sera probablement longue en géographie. Cette nouvelle démarche doit évidemment se fonder sur les outils disponibles en, si possible, les combinant.

10. Formes et cristallisation catastrophique locale

Ces formes en raison des cristallisations catastrophiques qu'elles représentent relèvent d'une logique géométrique qui se fonde à la fois sur des rapports de position dans un espace à deux ou trois dimensions – considéré comme euclidien dans un premier temps – et sur des rapports scalaires rarement simplement invariants d'échelle sur de larges gammes d'échelles, mais bien plus souvent covariants d'échelle (dimension fractale variable) comme l'a théorisé Laurent Nottale (2011), ce qui nous conduit à réfléchir dans un espace non euclidien.

En d'autres termes, il est possible d'envisager l'avènement d'une forme ou d'un assemblage de formes comme une cristallisation locale (comme la réalisation matérielle) paramétrée par un attracteur, une catastrophe au sens de René Thom, dont la complexité topologique, voire la fractalité est en rapport avec le niveau énergétique du système dynamique en jeu. Il sera plus simple si le niveau énergétique est faible. Mais, sous un apport important d'énergie, l'attracteur peut se structurer en échelles. La fractalité se retrouve donc au niveau des formes de l'EG, mais aussi au niveau de leurs descriptions structurelles. Son ubiquité n'en est que plus étonnante.

Sur cette base il est donc possible de penser le déploiement (ou le repliement lorsque l'énergie du système morphologique décroît) concomitant d'une forme (passage d'une SA à autre chose : plateau...) et de son attracteur. Pratiquement une injection d'énergie dans une surface d'aplanissement va donner un plateau (cf. l'Aubrac ou les Grands Causses). Si le mécanisme se poursuit, on obtient un relief de type alpin (haute montagne). Mais dans l'espace structurel de contrôle on passe d'un point à quelque chose de topologiquement et de géométriquement bien plus complexe ; chaque point correspondant à un état possible de la forme déployée. Une surface d'aplanissement ne correspond qu'à un seul état, d'où un seul point. Elle est très symétrique. Un massif alpin correspond certainement à une infinité d'états, d'où un attracteur complexe ; l'histoire géomorphologique correspondant à un cheminement, d'état en état, donc de point en point dans l'attracteur.

Ceci correspond à une illustration de la structure fondamentale décrite par René Thom dans la théorie des catastrophes (1991 ; 2003) et renvoie aux rapports entre saillances et prégnances. La surface d'aplanissement (comme saillance) par exemple (mais ce peut être toute forme à tout moment de son cycle) est soumise à une prégnance (l'apport d'énergie) qui conduit à la modification de la saillance initiale (morphogénèse). Celle-ci peut être graduelle (creusement progressif d'un lit de rivière...) ou disruptive (effondrement d'une paroi...).

Toutefois, en géographie et en géomorphologie, comme nous l'avons vu ci-dessus, l'histoire ne s'arrête pas là. Au-delà d'une phase de différenciation morphologique qui semble aboutir à un maximum de différences quand les formes deviennent covariantes d'échelles (dimension fractale variable), apparaît une phase d'indifférenciation progressive qui ramène, les reliefs quels qu'ils soient à un état de surface d'aplanissement en quelques centaines de millions d'années, certes, mais dans un temps fini. L'avenir de l'Himalaya est donc d'être une plaine !

Nous avons donc un cycle constitué d'une phase de différenciation qui est suivie par une phase d'indifférenciation. En géographie humaine on ne compte plus les villes qui ont disparu, les civilisations qui sont mortes et les systèmes politiques ou de production qui ne perdurent que dans les livres d'histoire. En géomorphologie, ce cycle a été très tôt repéré par William Morris Davis (1850 – 1934) et on parle alors de cycle davisien fondé historiquement sur l'observation des paysages désertiques du sud-ouest des États-Unis d'Amérique (HALLAIRE, 2011).

Lors de la phase d'indifférenciation, il faut donc se demander quelle peut être la prégnance en jeu. Très clairement c'est la nécessité thermodynamique fondamentale d'un retour à un état stable après injection d'énergie. C'est d'ailleurs le même pour la phase de différenciation. Seule l'écart entre les bornes du potentiel est différent, plus faible dans le cas de l'indifférenciation. La prégnance « vraie » est donc cet écart et sa force est relative à son ampleur. En fonction de celle-ci la traduction matérielle dans l'EG variera en conséquence.

Dans cette perspective les morphologies déployées sont donc au sens d'Ilya Prigogine (1968) des structures dissipatives qui accélèrent le retour à cet état stable. Cet accroissement momentané, localisé, de la dégradation d'énergie se « paye » donc par une apparition locale d'un ordre topologique et géométrique qui peut aller jusqu'à une structuration en échelles des formes de l'EG.

L'assemblage de formes qui constitue l'EG (physique et humain) n'est donc que la traduction d'une situation hors équilibre d'un point de vue thermodynamique. Que les réactions nucléaires de la graine s'arrêtent alors que le soleil continuerait à déterminer une dynamique externe et en quelques centaines de millions d'années les continents de la Terre seront aplanis, ce qui

est en partie le cas de l'Afrique peu marquée récemment par des phénomènes orogéniques (sauf sur sa limite nord, et autour du rift des Grands Lacs).

En d'autres termes, plus un système dégradera d'énergie, plus sa morphologie déployée dans — et constitutive de — l'EG sera topologiquement et scalairement, donc géométriquement complexe ; ce schéma étant valable tant pour des formes naturelles (un massif montagneux...) que pour des formes anthropiques (une agglomération...) et inversement. Il doit donc constituer un guide fondamental de l'étude des formes.

Dans cette dynamique, la géométrie euclidienne plane ou volumique (surface enveloppe en 2D ou 3D), et scalaire (fractale) déployées (par la dynamique ; les flux modèlent les formes) a pour fonction d'optimiser l'écoulement des flux afin de maximiser le taux de dégradation de l'énergie et donc, *in fine*, d'accroître la vitesse d'un retour à un état thermodynamiquement stable et cela conformément aux principes mêmes (seconde loi) de la thermodynamique.

En géomorphologie, la fractalité des reliefs se comprend aisément si on met en regard les volumes à araser, liés aux orogénèses, et la cinétique des réactions chimiques à la base de l'altération des roches (météorisation, désagrégation, puis transport). Au premier ordre ces vitesses sont lentes. Plus lentes pour la mise en solution de la silice que des carbonates, mais globalement lentes. Si tel n'était pas le cas, si les processus érosifs étaient très rapides, aucun relief ne pourrait apparaître puisque toute élévation serait immédiatement rabotée. C'est parce que l'érosion est environ dix fois plus lente que l'orogénèse que nous pouvons observer des reliefs et décrire une hétérogénéité topographique de la surface de la Terre (un processus orogénique est de l'ordre de 50 Ma alors que l'érosion complète des reliefs demandera de l'ordre de 500 Ma).

Cette altération s'applique sur la surface à l'interface avec l'atmosphère. On négligera ici la profondeur du front d'altération qui certes joue un rôle, mais ne modifie pas fondamentalement le raisonnement et les conclusions.

Si les reliefs étaient euclidiens, si les sommets des Alpes avaient des formes strictement pyramidales (faces lisses) comme peut s'en approcher une surface d'aplanissement, la surface proposée à l'altération serait minimale (surface enveloppe lisse, comme celle par exemple d'une carrosserie de voiture) et donc le temps pour un retour à une situation thermodynamiquement stable serait extrêmement long, pour ne pas dire infini. Or il n'en est rien. De très nombreux boucliers ou cratons sont de vieilles racines de montagnes de type alpin. Dès lors il est nécessaire qu'au moins un facteur supplémentaire intervienne pour accroître la vitesse de l'érosion des reliefs.

Ce facteur se sont les formes et plus particulièrement leur structuration fractale. C'est donc un facteur géométrique et la forme tout autant que sa

structure fractale qui deviennent causales. Une surface dont la dimension passe de 2 (plan) à 2,1 puis 2,2 puis 2,3... voit sa taille augmenter très fortement ; le réseau hydrographique (glyptogénèse) étant l'agent de cette fractalisation (encaissement, structure dendritique, arborescente...). La surface alors exposée à l'altération augmente donc fortement. Elle devient très importante.

Ainsi même si les cinétiques sont lentes (elles s'accroissent pour certaines avec l'altitude), le taux d'érosion devient compatible avec l'observation généralisée de la disparition, au fil des temps géologiques, des reliefs les plus altiers, comme le paléo Massif central en France qui fut une chaîne alpine au Primaire et dont il reste la racine nivelée (Aubrac) dont la limite sud-est a été portée en altitude récemment (contre coup de l'orogénèse alpine). Ceci a fait apparaître, au niveau d'escarpements de faille majeurs (faille d'Alès...), un talus topographique (la Cévenne) qui se voit profondément attaqué (en raison d'apports d'eau massifs et d'une pente forte : 1000 m pour 50 km) et où se développent donc des morphologies fractales (NOTTALE ; MARTIN ; FORRIEZ, 2012) covariantes d'échelle dont la courbe de niveau 450 m rend compte.

Dans le cas des karsts (MARTIN, 2003a ; 2003b) et plus largement pour les faciès karstifiables, la surface fractalisée est non seulement externe (exokarst, lapiés...), mais aussi interne (endokarst) dont une petite partie est visitable (grotte...). Il est donc logique que ces reliefs soient parmi ceux qui s'érodent le plus rapidement, toutes choses étant égales par ailleurs.

Pour les objets anthropiques comme les villes (ou d'autres), le raisonnement peut suivre le même cheminement. L'injection d'énergie, sous toutes ses formes (nourriture, biomasse, énergies carbonées, nucléaires...), produit de la même façon la constitution de formes, dans ce cas, urbaines, sur la base, non de vallées et de versants, mais de rues et de bâtiments. Ceux-ci deviennent de plus en plus importants, de plus en plus hauts et constituent de nouveaux quartiers et forment donc des villes de plus en plus vastes. Lorsque les villes sont suffisamment grandes le système morphogénétique, comme dans le cas des karsts, utilise la troisième dimension, c'est-à-dire bâtit une ville sous la ville (Canada) ou du moins y établit des réseaux (métro...), ce qui est énergétiquement très coûteux.

La fractalisation intervient alors progressivement et il apparaît possible de séparer une structuration scalaire pour de grandes (parcelles et blocs) et de petites échelles (niveau de l'aménagement et de l'urbanisme) avec entre ces deux situations souvent d'invariance d'échelle (dimension fractale constante), une échelle dite de coupure (FORRIEZ, 2010). Il semble même possible, au moins par une expérience de pensée, d'envisager de très grandes échelles, celles des inscriptions sur les disques durs d'ordinateur, ce qui étend de façon extraordinaire la gamme scalaire en travail. Tout ceci actuellement et depuis deux à trois siècles repose sur une dissipation croissante d'énergie, quels que soient

les vecteurs utilisés (du gaz pour chauffer les bâtiments, de l'essence pour rouler, de l'électricité pour les commandes numériques...), laquelle a reposé sur une productivité importante, semble-t-il exceptionnelle, à l'échelle de l'humanité.

Sur cette base il apparaît logique de penser que toute décroissance majeure de la consommation d'énergie (ce qui ne signifie pas que l'on ne puisse pas changer d'énergie primaire) fera passer le système d'une phase de croissance de l'hétérogénéité morphologique à une phase de décroissance de cette hétérogénéité. Que deviendront alors les tours construites, ou en construction, s'il n'y a plus, à volonté, l'électricité pour monter les matériaux et les occupants de ces gratte-ciels, à plus de deux-cents mètres?

Globalement la même chose qu'il est advenu à Rome du Colisée : une ruine ! Un bâtiment en voie de disparition comme bien d'autres moins célèbres, sans parler de tous ceux dont nous ne retrouvons que les fondations. Dans ce cas aussi l'état thermodynamiquement stable c'est une quasi-absence de forme, de formes élevées, de formes élancées. L'exemple de Rome, mais aussi maintenant de ces cités inconnues que des Lidars permettent de mettre à jour sous les canopées tropicales sont de bons exemples de cette uniformisation des formes lorsque l'énergie vient à manquer et cela quelles qu'en soient les causes (épuisement, dysfonctionnement politique, guerre, épidémie...) qui sont généralement multiples et interpénétrées.

Ainsi peut se trouver explicité et compris (donc décrit et en partie formalisé) le caractère causal des formes qu'il ne faut donc pas réduire à leur seul rôle de filtre des flux.

Dans cette approche théorique, la logique développée par René Thom se trouve donc intimement mêlée à celle proposée par Bernard Mandelbrot pour autant que les systèmes considérés — et l'EG est de ce type — soient des structures dissipatives au sens d'I. Prigogine. La définition de ce cadre physique conduit toutefois à une difficulté.

11. Formes et processus sans sujet

Cette conception qui pourrait être déclinée dans bien des domaines morphogénétiques rencontre en géographie une difficulté supplémentaire dans la mesure où si une ville, après analyse par exemple de son bâti (ou de ses réseaux...), s'avère être une fractale — ce que d'innombrables travaux montrent — il faut toutefois bien convenir que jamais personne, du maçon à l'architecte en passant par le commanditaire, fût-il le Baron Hausmann, du moins jusqu'aux travaux de Benoît Mandelbrot des années soixante, n'a voulu qu'il en soit ainsi. Cette situation correspondant, dans la littérature, à ce que l'on nomme un processus sans sujets.

Certes sans sujets qui pensent ce mode d'organisation particulier, mais pas sans sujets qui ont agi, sans le savoir, pour aboutir à ce mode d'organisation fractale. Dès lors il faut convenir qu'ils ont au moins agi en dehors de toute conscience ou, position plus maximaliste, qu'ils ont été agis. Au regard d'une pensée rationnelle, occidentale, moderne de la liberté humaine, ceci pose des problèmes philosophiques, épistémologiques... très importants. Nos sociétés ont donc produit involontairement un niveau de complexité majeur des formes anthropiques.

Cela étant, comme si indiqué ci-dessus le lien entre l'organisation en échelles et la dissipation d'énergie est majeur, il est logique de retrouver par exemple pour des ensembles urbains une morphologie fractale, pour la nappe du bâti, pour les réseaux de transport, etc. Ceci montre simplement que les activités humaines, les projets et autres aménagements, les réalisations qu'elles soient réalisées dans l'espace rural entre les cités (zones périphériques) ou dans les aires urbaines elles-mêmes sont sous la contrainte des lois de la nature. Celles-ci doivent donc être prises en compte ce qui conduit mécaniquement à une physique de la géographie y compris humaine. Sur la base d'un tel réalisme, il est ensuite possible de faire au mieux soit sur une base empirique soit en capitalisant de la façon la plus intelligente possible les informations disponibles dans une perspective sociétale.

Pratiquement, il faudrait construire les villes lorsqu'elles dissipent autant d'énergie en tenant fortement compte de leur nécessaire organisation en échelle, ou alors faire des ensembles urbains bien plus modestes, ce qui minimiserait l'importance de la structuration scalaire. Actuellement, globalement, celle-ci est un impensé géographique. Mais plus un ensemble urbain dégradera d'énergie, plus il devra être pensé scalairement.

Dès lors, il devient utile d'abord, en se fondant sur des cas purement géomorphologiques (la géomorphologie devenant un laboratoire physique de la forme), de chercher à pousser plus loin cette conception thomomandelbrotienne de la forme, avant de revenir à une théorisation des formes anthropiques qui ne devraient plus être pensées et réalisées à partir d'un cadre strictement euclidien, ce qui est pourtant le plus souvent le cas comme le démontre le vocabulaire aménagiste (dalle, coulée, bloc...). C'est ce que nous proposerons dans d'autres textes. Cet acquis permettra ensuite d'aborder, avec des outils et des conceptions mieux affirmées, les formes anthropiques afin de déboucher *in fine* sur une théorisation de l'EG et donc sur une théorie physique et formelle résolvant certaines questions du projet géographique.

Ce faisant il deviendra possible de reformer, autour de la question de la forme, une unité de la géographie au travers d'une renaturalisation, laquelle devrait décupler l'utilité sociale de cette discipline. ●

Références

- BAULIG, Henri. *Essais de géomorphologie*. Paris : Les Belles Lettres, 1950. 160p. (Publication de la Faculté des Lettres de l'Université de Strasbourg, fasc. 114).
- BLOOM, Nicholas *et al.* Are Ideas Getting Harder to Find? *American Economic Review*, v. 110, n. 4, p. 1104–1144, 2020. Disponible sur : <https://doi.org/10.1257/aer.20180338>. Consulté le : 11 mar. 2023.
- DE LA BLACHE, Paul Vidal. *Tableau géographique de la France*. Paris : Édition de la Table Ronde, 1994.
- DE LA BLACHE, Paul Vidal. Des caractères distinctifs de la géographie. *Annales de géographie*, n. 124, p. 289-299, 1913. Disponible sur : https://www.persee.fr/doc/geo_0003-4010_1913_num_22_124_8245. Consulté le : 11 mar. 2023.
- DE LA BLACHE, Paul Vidal. *Principes de géographie humaine*. Paris : Librairie A. Colin, 1921.
- D'ESPAGNAT, Bernard. *Physique et réalité*. Paris : Diderot multimédia éditeur, 1998.
- FORRIEZ, Maxime. *Caractérisation formelle des structures multi-échelles géographiques en relativité d'échelle*. Exemples en géographie physique, géographie urbaine, géohistoire et géographie du peuplement. 2010. 406 p. Thèse (Spécialité en Géographie) – l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse (UAPV), Avignon, 2010.
- FORRIEZ, Maxime ; MARTIN, Philippe ; NOTTALE, Laurent. Multiscalar structures in geography: contributions of the scale relativity. *Cartographica*, v. 55, issue 2, p. 99-123, 2020. Disponible sur : <https://doi.org/10.3138/cart-2019-0006>. Consulté le : 11 mar. 2023.
- GALLOUÉDEC, Louis ; MAURETTE, Fernand ; MARTIN, Jean. *Géographie générale*. Classe de seconde. Paris : Hachette, 1926.
- HALLAIRE, Gaëlle. Théorie du paysage et théorie du relief dans la première moitié du XX^e siècle : Siegfried Passarge (1867-1958) versus William Morris Davis (1850-1934). *Géomorphologie : relief, processus, environnement* [En ligne], v. 17, n. 3, p. 319-334, 2011. Disponible sur : <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.9520>. Consulté le : 11 mar. 2023.
- HUYGHE, René. *Formes et forces*, de l'atome à Rembrandt. Paris : Flammarion, 1971.
- MANDELBROT, Benoît. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, v. 156, n. 3775, p.636-638, 1967. Disponible sur : <https://www.jstor.org/stable/1721427>. Consulté le : 11 mar. 2023.
- MANDELBROT, Benoît. *Les objets fractals*. forme, hasard et dimension. Paris : Flammarion, 1975.
- MANDELBROT, Benoît. *Fractals: form, chance and dimension*. New York : W. H. Freeman, 1977.
- MARTIN, Philippe. Construire un objet géographique. Recherche d'une méthodologie. *In*: MABY, Jacques (dir.). *Objets et indicateurs géographiques*. Paris : CNRS Editions, 2003a, p. 42-88. (Collection Actes Avignon n° 5, Université d'Avignon et UMR ESPACE 6012). 1 graphe.

MARTIN, Philippe. Objectivation des formes en géographie et calculs d'indicateurs fractals. Exemples karstiques. In : MABY, Jacques (dir.). *Objets et indicateurs géographiques*. Paris : CNRS Editions, 2003b, p. 153-268. (Collection Actes Avignon n° 5, Université d'Avignon et UMR ESPACE 6012). 19 fig., 3 graphes, 8 tabl.

MARTIN, Philippe. *Modélisation fractale et structurale des formes en géographie*. Réflexion développée à partir d'exemples karstiques. Habilitation à diriger les recherches. Avignon: Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse, 2004. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/315700639_Modelisation_fractale_et_structurale_des_formes_en_geographie_Reflexion_developpee_a_partir_d'exemples_karstiques_Habilitation_a_diriger_des_recherches_de_geographie_Tome_1_Memoire_principal_et_origi. Consulté le : 11 mar. 2023.

MARTIN, Philippe ; FORRIEZ, Maxime ; NOTTALE, Laurent. Le fil d'Ariane du dédale scalaire de l'espace-temps géographique. *Géopoint*, n. 19, p. 23-45, 2012. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/335160559_Le_fil_d'Ariane_du_dedale_scalaire_de_l'espace-temps_geographique. Consulté le : 11 mar. 2023.

MAURETTE, Fernand. *Pour comprendre les paysages de la France*. Paris : Hachette, 1923.

MICROCOSMOS, Arthur et les minimoys. Production de Luc Besson. France : EuropaCorp. Distribution, 2006. 1 DVD (94 min).

NOTTALE, Laurent. *Scale relativity and fractal space-time: a new approach to unifying relativity and quantum mechanics*. Londres : Imperial College Press, 2011.

NOTTALE, Laurent ; MARTIN, Philippe ; FORRIEZ, Maxime. Analyse en relativité d'échelle du bassin versant du Gardon (Gard, France). Étude de la variation de la dimension fractale en fonction de l'altitude et de l'échelle. *Revue internationale de géomatique*. v. 22, n. 1, p.103-133, 2012. Disponible sur : doi:10.3166/ri.22.103-133. Consulté le : 11 mar. 2023.

PETITOT, Jean. *Pour un schématisme de la structure. De quelques implications sémiotiques de la théorie des catastrophes*. Vol. 4. Paris : Presses Universitaires de France, 1982.

PETITOT, Jean. *Forme*. Paris : *Encyclopaedia Universalis*, XI, 1989. p. 712-728.

PETITOT, Jean. *Neurogéométrie de la vision*. Modèles mathématiques et physiques des architectures fonctionnelles. Paris : Les éditions de l'École polytechnique, 2008.

PRIGOGINE, Ilya. *Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles*. Paris : Dunod, 1968.

RODDIER, François. *Thermodynamique de l'évolution*. Un essai de thermo-bio-sociologie. Artignosc-sur-Verdon : Parole éditions, 2012. (Le temps d'apprendre).

RODDIER, François. *De la thermodynamique à l'économie : le tourbillon de la vie*. Artignosc-sur-Verdon : Parole éditions, 2018. (Le temps d'apprendre).

THOM, René. *Modèles mathématiques de la morphogenèse*. Paris : Christian Bourgeois, 1980.

THOM, René. *Esquisse d'une sémio physique*. Physique aristotélicienne et théorie des catastrophes. Paris : InterEdition, 1991.

THOM, René. *Œuvres complètes*. Production : Michèle Porte et Jean Pierre Bourguignon. Distribution : Institut des Hautes Études Scientifiques, 2003. 1 CD-Rom. ISBN : 2-9518176-0-6.

Forma e geografia: de René Thom a Benoît Mandelbrot

 MARTIN, Philippe

Resumo: A história da forma é um conceito complexo que remonta à antiguidade grega, ao longo deste artigo vamos observar diferentes facetas desse conceito no contexto particular da geografia. Desenvolveremos diversas perspectivas sobre a forma em geografia e sobre a sua ontologia "local". Veremos ainda como este conceito tem sido abordado, na geografia física, na geomorfologia, tendo em conta vários momentos históricos e sucessivos enquadramentos científicos. A geomorfologia servirá de laboratório físico para aprofundar a noção de forma em geografia. Nesta pesquisa cruzaremos conceitos de pensadores de diferentes épocas, como Goethe, d'Arcy Thompson, Prigogine, mas sobretudo, René Thom e Benoît Mandelbrot, pensadores que nos ofereceram as ferramentas para conceber uma visão renovada da forma em Geografia.

Palavras-chave: forma e geografia; geomorfologia; dimensões escalares; fractal; morfogênese.

Como citar este artigo

MARTIN, Philippe. Forme et géographie: de René Thom à Benoît Mandelbrot. *Estudos Semióticos* [online], vol. 19, n. 1. São Paulo, abril de 2023. p. 302-329. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/esse>. Acesso em: dia/mês/ano.

How to cite this paper

MARTIN, Philippe. Forme et géographie: de René Thom à Benoît Mandelbrot. *Estudos Semióticos* [online], vol. 19, issue 1. São Paulo, April 2023. p. 302-329. Retrieved from: <https://www.revistas.usp.br/esse>. Accessed: month/day/year.

Data de recebimento do artigo: 31/01/2023.

Data de aprovação do artigo: 20/03/2023.

Este trabalho está disponível sob uma Licença Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0 Internacional.

This work is licensed under a Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0 International License.

