



Théories de la complexité et des formes

André Dauphiné

Département de Géographie
Université de Nice Sophia-antipolis

Introduction

● Difficulté de l'épreuve car

- ⊙ Un paradigme très vaste et très fréquenté : une dizaine de livres français au dernier trimestre dans diverses sciences
- ⊙ Des avancées et des oublis avec des effets de mode incessants : **Théorie de réaction diffusion présentée à travers modèles de Meinhardt aux Journées européennes de Géographie quantitative et théorique dès 1985**

● Trois ensembles de réflexions

- ⊙ Un bref cadrage épistémologique
- ⊙ Comment les théories de la complexité sont liées aux formes ou l'inverse
- ⊙ Réflexions sur quelques problèmes de modélisation rencontrés par les géographes

● Auparavant bien fixer les définitions

- ⊙ Théorie = ensemble de lois
 - ⊙ reliées par principes internes (lois de degré supérieur),
 - ⊙ Ensemble construit sur des axiomes,
 - ⊙ Ensemble de lois relié au monde « connu » ou « réel » par principes externes
- ⊙ Modèle : représentation d'une loi, d'une théorie, d'un phénomène

Le cadre épistémologique

● Le triomphe de Bachelard

- Progrès scientifique = abstraction croissante. Problème majeur pour les sciences sociales qui se raccrochent au réel, à ce qui est visible (réalisme naïf)
- Phénomènes ont plusieurs explications : une par différentes sciences classiques. Mais à un autre niveau d'abstraction une autre explication : comparer nervure des feuilles, réseau sanguin, réseau urbain et réseau Internet. Ne plus expliquer par une fonction réductionniste, mais par des mécanismes plus généraux
- Exemple des troupeaux, vols, essaims explication des sciences classiques : optimisation par un instinct de sauvegarde, mais explication de science de la complexité : alignement plus attraction et répulsion donnent un résultat identique
- sciences de la complexité ne s'opposent pas aux sciences classiques, mais comment règles simples suffisent pour expliquer variété du monde

● L'individualisme méthodologique

- Dans toutes les sciences un débat parfois ancien macro-micro (entropie physique, économie, évolution darwinienne, sociologie)
- Sciences de la complexité privilégient d'abord le niveau micro et se distinguent des sciences classiques qui privilégiaient le macro
- Situation actuelle : des recherches sur les interactions entre les individus, mais aussi entre plusieurs niveaux

Caractères de la complexité

⊙ Des caractères fonctionnels

- ⊙ Un grand nombre d'éléments en interactions, soit linéaires, soit le plus souvent en boucles donc non linéaires (exemple de l'autocatalyse bien connue en géographie industrielle : l'industrie attire l'industrie)
- ⊙ Auto organisation : organisation spontanée, exemples de la convection, du déplacement des fourmis ou des résidents d'une ville (absence de chef, mais hiérarchie dans organisation)
- ⊙ Émergence fonctionnelle : propriétés globales non directement déductibles des propriétés des éléments (déjà présente sous cette forme dans molécule H₂O formée par deux atomes)
- ⊙ En plus dans les sciences du vivant et sociales : Principe d'adaptation par apprentissage

⊙ Des caractères spatio-temporels

- ⊙ Imprévisibilité spatio-temporelle du comportement car sensibilité aux conditions initiales
- ⊙ Fractalité des lois fréquentielles mais aussi temporelles et des répartitions spatiales
- ⊙ Des brisures de symétrie à l'origine des formes nées de bifurcations ou d'instabilités
- ⊙ Des systèmes multi échelles : multi niveaux, multi temporels, multi représentations, multi spatiaux : interactions entre niveaux et échelles sont essentielles

⊙ Ces caractères fonctionnels et spatio-temporels sont interdépendants

Panorama de quelques avancées théoriques : théorie du chaos

● Brefs rappels sur la théorie

- Des systèmes déterministes, sensibles aux conditions initiales, présentent des comportements imprévisibles. Mais ce chaos est borné : exemple de la prévision du temps
- Passage du désordre au chaos par une succession de bifurcations dans le temps

● Ses liens avec la complexité et les formes

- Explique principalement l'imprévisibilité et l'émergence de nouveaux comportements dans le temps. Peu de relation avec les formes dans sa version initiale

● Trois développements récents

- Avec introduction de la dimension spatiale (Bergé) le chaos est synonyme de turbulence faible et il explique la fractalité des formes physiques (modèle de la perturbation fractale que nous avons lié à la turbulence dépressionnaire).
- Débat avec Bak sur l'origine de la fractalité (Sapoval, Sornette) : six ou sept mécanismes dont deux essentiels (attachement préférentiel, criticalité)
- Pourquoi le monde régit par des lois non linéaires n'est pas chaotique. Trois effets stabilisants : Le déphasage temporel, le rôle de l'espace (simulation de modèles aux dérivées partielles) et l'augmentation du degré de liberté (ex : remise en cause du modèle de Lorenz par Raoul Robert)

Panorama de quelques avancées théoriques : théorie de Turing

● Brefs rappels sur la théorie

- Une idée antique : la dynamique, le mouvement produit des formes
- Couplage de deux mécanismes élémentaires : production ou réaction + diffusion
- Redécouverte sous de multiples noms : Luther (1906), Lotka, Fischer, Kolmogorov, Belousov-Zhabotinsky, et surtout article de Turing de 1952, puis travaux de Prigogine (structures dissipatives). Toujours un couplage de ces deux mécanismes

● Ses liens avec la complexité et les formes

- Étude détaillée des fronts et de leur déplacement, des formes de propagation
- Auto organisation et émergence de formes stationnaires si entrée d'énergie : Produit des formes innombrables fractales et non fractales
- Émergence de systèmes multi échelles lors des simulations

● Quelques développements récents

- Simulation avec des fonctions originales de croissance (Meinhardt)
- Recherches sur les diffusions anormales (vol de Levy, diffusion dans les fractals), et surtout les diffusions contraintes (taille réduite = bandes, taille vaste = tâches)
- Ajout de l'advection ou transport (laminaire, convectif ou chaotique : études sur le plancton) et prise en compte de plusieurs « populations »

Panorama de quelques avancées théoriques : théorie de Bak

● Brefs rappels sur la théorie de l'auto organisation critique :

- Ne pas confondre avec les théories de l'auto organisation qui sont souvent aspatiales
- Relation entre deux concepts : auto organisation et la criticalité (criticité)
- L'état critique est un attracteur atteint à partir de conditions initiales très différentes. Système tend vers l'état critique de façon spontanée (modèle du tas de sable)

● Ses liens avec la complexité et les formes

- Explique autonomie, et la fractalité des lois fréquentielles, temporelles et spatiales
- Explique hiérarchie des formes : exemple du modèle de Schelling
- Explique de nombreuses anomalies spatiales (incendies de forêts)

● Quelques développements récents

- Dans le monde du vivant, la forme qui émerge doit rester viable et simulation sur des paysages d'adaptation (fitness) qui co évoluent. Prise en compte du principe de sélection naturelle
- Travaux sur la dynamique des réseaux : aléatoires ou invariants d'échelle (réseaux de type internet avec hiérarchie induit par effet de renforcement des sites les plus visités)
- Le problème de la validité de cette théorie et de ses liens avec théorie de Turing

Panorama de quelques avancées théoriques : théorie de Béjan

● Brefs rappels sur la théorie constructale

- ⊙ Le monde se construit par agrégation à partir de briques élémentaires
- ⊙ Assemblage se fait selon un principe d'optimisation :
 - ⊙ Fondé sur une position « classique » en science : principe d'optimisation, cas fréquent du principe de moindre action
 - ⊙ Pour d'Arcy Thompson optimisation des formes par des forces mécaniques
 - ⊙ Pour Béjan optimisation par lois thermodynamiques (énergie) : les systèmes d'écoulement évoluent pour former les meilleures formes d'écoulement. Mais imparfaits car contraintes : résistances à l'écoulement. Exemple : entre deux points : tube rond et droit, entre un point et une surface : arbre hiérarchisé selon loi de Murray.

● Ses liens avec la complexité et les formes

- ⊙ Explique la hiérarchie et la fractalité des formes en réseaux
- ⊙ Études en ingénierie, réseaux de transport urbains

● Quelques développements récents

- ⊙ Reste pratiquement inconnue en géographie

Autres théories candidates

● La théorie de la relativité fractale de Nottale

- ⊙ Brefs rappels sur la théorie : l'espace et le temps sont fractales. Elargissement du principe de relativité après Galilée, puis Einstein
- ⊙ Ses liens avec la complexité : la complexité dans monde euclidien, car mauvais repères spatio-temporels, disparaîtrait dans repères fractals. Quelques développements récents : travaux de Jean Chaline sur évolution pour expliquer équilibres ponctués

● La théorie des catastrophes de Thom

- ⊙ Intérêt majeur : la mise en valeur de bifurcations élémentaires dans la genèse des formes, explique aussi hystérésis, et de plus introduction de variables de contrôle
- ⊙ Sa faiblesse : pas d'espace dans sa version originale et peu d'études en cours

● Théorie sur la croissance de la complexité (Arthur)

- ⊙ Systèmes composés d'un grand nombre d'agents qui co évoluent : La complexité augmente en relation avec augmentation de la diversité
- ⊙ Systèmes qui modifient leur structure interne en multipliant les sous systèmes
- ⊙ Système capture des éléments plus simples et les combine suivant des règles de grammaire : langage, électronique, évolution plus rapide

Pb de modélisation : Mesurer la complexité

- Pas encore de mesure totalement pertinente, mais des solutions en vue
- Deux approches classiques peu utiles en Géo
 - ⊙ la complexité algorithmique de Kolmogorov qui permet de repérer chaos dans un espace de phase
 - ⊙ La profondeur logique de Bennett : mesure la complexité en temps de calcul
- Quelques nouvelles mesures statistiques
 - ⊙ Idée de départ : complexité a une double origine, entropie du système et sa propension au déséquilibre $C = H.D$
 - ⊙ Entropie insuffisante car égale à 0 pour un bruit blanc et 1 pour ordre parfait : deux états non complexes. Complexité se situe entre ces deux extrêmes.
 - ⊙ H est mesurée par entropie de Shannon ou une entropie dérivée des entropies généralisées de Rényi ou de Tsallis.
 - ⊙ D mesure le déséquilibre par rapport à équirépartition : sa valeur est fonction de la plus ou moins grande répartition des états probables
 - ⊙ **Un exemple de recherche en cours : trouver les échelles pertinentes avec ondelettes, puis étudier leur interactions avec entropies**

Pb de modélisation : repérer les lois puissances

- Des lois originales avec deux traits originaux :
 - ⊙ variance infinie et donc catastrophe
 - ⊙ invariance d'échelle
- Une longue histoire : Pareto, Levy, Mandelbrot
- Très proches des lois log normales, de même forme, parfois même origine, mais qui ont une variance finie
- Des solutions techniques sophistiquées pour les distinguer

Pb de modélisation : Étude inductive des systèmes multi échelles

- Les approches géostatistiques
- Les analyses d'allométrie pour étudier les croissances différentielles
- La mise en évidence de textures : par morphologie mathématique, par indicateurs des matrices d'occurrence et de co occurrence
- De la décomposition de Fourier à la décomposition en ondelettes, puis curvelets, mais aussi plus simplement la décomposition des entropies quand on connaît l'organisation multi-échelle
- Détermination des dimensions fractales, des fonctions multifractales et de leur généralisation (Infinite divisible cascade)
- Les groupes de renormalisation coarse graining et rescaling
- De nombreux liens entre ces techniques : exemple de la multifractalité mesurée à partir des géostatistiques, de la morphologie mathématique, de l'entropie généralisée de Rényi, de la décomposition en ondelettes

Pb de modélisation : La simulation des systèmes multi échelles (1)

● La stratégie des physiciens (J-Cl. Legris)

- ⊙ Equation régissant l'échelle macro (déterministe) : croissance, diffusion
- ⊙ Expression d'une ou plusieurs variables de cette équation en fonction de l'échelle micro
- ⊙ Equation régissant l'échelle micro (stochastique)

● Les problèmes

- ⊙ Deux points positifs :
 - ⊙ les outils classiques du calcul différentiel avec espace des phases et étude précise des bifurcations et des instabilités
 - ⊙ De nombreux centres de recherches multiscaling qui se constituent
- ⊙ Mais en négatif :
 - ⊙ Approche par des techniques qui intègrent mal l'adaptabilité des systèmes vivants et sociaux
 - ⊙ Manque de souplesse pour intégrer les conditions initiales, par exemple structure de l'espace géographique
 - ⊙ Un formalisme mathématique difficile : équations différentielles partielles et les éléments finis

Pb de modélisation : La simulation des systèmes multi échelles (2)

● Les stratégies de l'individualisme méthodologique

- ⊙ Une même logique de départ : des individus (particules, molécules, agents). avec des interactions simples (attraction, répulsion). Puis introduire de la souplesse pour se rapprocher des contraintes du réel : un avantage parfois déterminant
 - ⊙ Réseaux neuronaux pour simuler apprentissage par descente du gradient ou technique du recuit simulé
 - ⊙ Algorithme génétique pour introduire principe de sélection naturelle : évolution darwiniste
 - ⊙ Optimisation par essaim
- ⊙ Un exemple actuel de recherches très actives : Les réseaux car ils illustrent les interactions ; Exemple des réseaux aléatoires et réseaux invariants d'échelle
 - ⊙ Connexion tirée au sort, nombre de liens par nœuds suit une loi de Gauss, sensibles aux pannes accidentelles
 - ⊙ Connexion suivant une loi puissance (Internet), sensibles aux attaques ciblées. Cas sans doute fréquent des réseaux urbains
- ⊙ Un énorme problème : définir les attracteurs dans l'espace des phases, puis étudier leur évolution, avec bifurcations et instabilités
 - ⊙ Un état d'équilibre est obtenu à « l'infini » quand l'image est stabilisée (état d'équilibre = énergie minimale = attracteur), mais en fait indéfinissable et très sensible aux conditions aux limites. **Le cas original des réseaux booléens aléatoires**
 - ⊙ Après classification de Wolfram de nombreuses tentatives pour lier un comportement complexe et l'évolution de ces modèles

Conclusion

● Complexité et sciences classiques :

- ⊙ Complexité émerge de la simplicité, elle est obtenue par combinatoire de lois simples, ne remet donc pas en cause science classique, mais constitue un prolongement
- ⊙ Irrite profondément car les sciences de la complexité ignorent les explications disciplinaires, mais partent de mécanisme simples : exemple du modèle de Schilling

● Nouvelle perception de problèmes concrets

- ⊙ Comment aller plus vite dans un flux complexe ou chaotique (autoroute encombrée) ?
- ⊙ Quelle est la meilleure stratégie de vaccination face à une épidémie ?
 - ⊙ Solution « laisser faire » de type logistique
 - ⊙ Solution « égalitaire ou équitable » avec tirage aléatoire
 - ⊙ Solution fondée sur complexité des réseaux sociaux « petits monde »

● De grandes ruptures idéologiques pour SHS

- ⊙ Économie classique, libérale ou marxiste, est une économie de système en équilibre : loi des rendements décroissants
- ⊙ Mais pour économie hors de l'équilibre existe aussi un feedback positif avec rendements croissants, car un produit devient une norme que tout le monde veut