

Table des matières

Introduction	15
Partie 1. Modéliser les relations sociétés-nature	23
Introduction de la partie 1.	25
Chapitre 1. Paradoxes théoriques de la géographie classique . . .	27
1.1. Une théorie toujours rejetée, l'environnementalisme	28
1.2. Le double paradoxe théorique de la géographie classique	29
1.2.1. Un refus majoritaire de l'approche théorique.	30
1.2.2. En géographie physique, des théories par sous-disciplines.	30
1.2.3. Deux paradigmes empruntés aux sciences sociales : structuralisme et marxisme	31
1.2.4. Les théories de l'évolution au centre de la géographie classique	33
1.3. La théorie générale des systèmes et les théories qui en dérivent.	35
1.3.1. Une théorie formelle pour unifier la géographie	35
1.3.2. Des théories dérivées de la théorie générale des systèmes	36
1.3.2.1. La théorie des systèmes auto-organisés.	36
1.3.2.2. La théorie du chaos déterministe.	37
1.4. Conclusion	39
1.5. Annexe, dossier 2 : importer des données dans <i>Mathematica</i>	39

**Chapitre 2. Modèles statistiques et probabilistes
des relations sociétés-nature**

43

- 2.1. Reconnaître le modèle probabiliste de données recensées 44
 - 2.1.1. Quatre approches pour déterminer la loi probabiliste
d'une série de données. 44
 - 2.1.2. Etude de cas : le PNB/habitant en Afrique 46
- 2.2. Modéliser les relations entre deux ou plusieurs variables. 48
 - 2.2.1. Répondre aux questions posées par un tableau de données 48
 - 2.2.2. Eviter les pièges de la corrélation linéaire et monotone 49
 - 2.2.2.1. Commencer par une approche graphique. 49
 - 2.2.2.2. Tester la dépendance entre deux séries de données. 50
 - 2.2.2.3. Mesurer l'intensité des corrélations 51
 - 2.2.2.4. Attention danger : le traitement des données
de proportion. 53
 - 2.2.3. Des modèles de régression pour tout type de données 53
 - 2.2.3.1. Le principe d'un modèle de régression 53
 - 2.2.3.2. Tester la validité du modèle de régression 54
 - 2.2.3.3. Etude de cas : la dette des états européens
dépend-elle de leur population ? 55
 - 2.2.3.4. Un modèle de régression multiple :
police et criminalité en Europe. 58
 - 2.2.3.5. Quelques généralisations du modèle
de régression linéaire 58
 - 2.2.4. Interpoler pour combler le vide des données manquantes 59
 - 2.2.5. De la classification à la régionalisation 60
 - 2.2.5.1. Une infinité de classifications 60
 - 2.2.5.2. Exemples de classification par partitionnement
et de classification ascendante hiérarchique :
la criminalité en Europe. 61
 - 2.2.5.3. La régionalisation : une classification d'espaces contigus 64
 - 2.2.5.4. Classement et apprentissage automatique 65
 - 2.2.6. Des analyses factorielles pour analyser conjointement
la structure des variables et la structure
des objets géographiques 65
 - 2.2.6.1. Une modélisation très pratiquée
en sciences géographiques 66
 - 2.2.6.2. Modèles d'analyse en composantes principales
et d'analyse des correspondances 67

2.3. Temporalités et modèles de séries chronologiques	70
2.3.1. Le géographe face à sept questionnements	70
2.3.2. Comprendre et tester la non-stationnarité d'une évolution	73
2.3.2.1. Distinguer les deux non-stationnarités, déterministe et stochastique	73
2.3.2.2. Trois tests pour vérifier la stationnarité : le corrélogramme simple, la recherche de racines unitaires, l'exposant d'un spectre de puissance	74
2.3.3. Déterminer la persistance : corrélogramme et variogramme	77
2.3.4. Décomposer une chronique en tendance, cycles et comportement aléatoire	78
2.3.4.1. Ajuster une tendance par un modèle de régression	78
2.3.4.2. Tester la présence de cycles : corrélogrammes et périodogrammes	79
2.3.5. Repérer les événements exceptionnels, leur intensité et leur répétition.	80
2.3.5.1. Détection automatique et analyse classique des extrêmes	81
2.3.5.2. Repérer les singularités avec la décomposition en ondelettes	83
2.3.5.3. Mesurer la fractalité des séries chronologiques	84
2.3.6. Le difficile choix d'un modèle probabiliste.	86
2.3.6.1. Modéliser des chroniques à l'aide de processus stochastiques	86
2.3.6.2. Une grande variété de modèles de processus stochastiques	87
2.3.6.3. Un exemple : le réchauffement global à la station de Bruxelles	90
2.3.6.4. De l'utilité prévisionnelle des modèles stochastiques	91
2.3.7. La modélisation des séries temporelles bivariées et multivariées.	91
2.3.7.1. Repérer et analyser les relations entre deux séries temporelles : corrélation et variogramme croisés, corrélations d'ondelettes	91
2.3.7.2. Introduction aux modèles à retards échelonnés	94
2.4. Conclusion	95
2.5. Annexe, dossier 3 : programme de traitements d'une série chronologique	95

Chapitre 3. Modèles de systèmes dynamiques ordinaires	97
3.1. Quatre questionnements pour comprendre le comportement d'un système dynamique.	98
3.2. Initiation à la modélisation des systèmes dynamiques.	98
3.2.1. Les étapes d'une modélisation par un système d'équations différentielles ordinaires.	99
3.2.2. Temps discret et temps continu : équations aux différences et équations différentielles	100
3.2.3. Trois méthodes, analytique, numérique et qualitative, pour étudier un système dynamique	102
3.2.4. Approche qualitative des systèmes dynamiques	104
3.2.4.1. Construire et interpréter un champ de directions	104
3.2.4.2. Repérer les états stationnaires et qualifier leur stabilité	106
3.2.4.3. Etude visuelle du plan de ligne ou du plan de phase : attracteurs, bassins d'attraction et résilience	107
3.2.4.4. A la recherche des bifurcations	109
3.2.4.5. Des approches numériques pour vérifier les conclusions visuelles	111
3.3. Atouts et contraintes des modèles d'équations différentielles ordinaires.	115
3.3.1. Les apports des modèles d'équations différentielles ordinaires pour comprendre l'évolution de systèmes géographiques.	115
3.3.2. Une contrainte surmontée : le réductionnisme de ces modèles	117
3.4. Des modèles plus réalistes de systèmes géographiques	117
3.4.1. L'exploitation d'un stock : pêcheries, ressources non renouvelables et développement durable.	117
3.4.2. Délais temporels et introduction d'événements exceptionnels dans un modèle dynamique	120
3.4.3. Les modèles d'interaction entre deux populations.	122
3.4.3.1. Présentation générale des modèles de compétition	122
3.4.3.2. Traitement avancé d'un modèle de compétition interspécifique	124
3.4.4. Modèles de comportement des systèmes multistocks.	127
3.4.4.1. De deux à trois, puis x stocks : le modèle épidémiologique classique (SIR)	128
3.4.4.2. D'une évolution simple au comportement chaotique d'un système géographique.	131

3.5. Conclusion	133
3.6. Annexe, dossier 4 : le comportement de foule en situation de catastrophe	133
Partie 2. Modéliser les localisations géographiques	137
Introduction de la partie 2.	139
Chapitre 4. Théories des localisations géographiques	141
4.1. Introduction aux théories d'économie spatiale	142
4.1.1. La théorie de von Thünen : la localisation des productions agricoles	142
4.1.2. La théorie de Weber : les localisations industrielles.	144
4.1.3. Deux catégories de théories pour expliquer la localisation des activités de service.	146
4.1.3.1. La théorie des places centrales et les localisations interurbaines	146
4.1.3.2. La théorie de concurrence spatiale de Hotelling et les localisations intra-urbaines	149
4.2. Une nouvelle économie urbaine et une nouvelle économie géographique	149
4.2.1. De nouvelles localisations dans l'espace contemporain	149
4.2.2. Alonso : la théorie de von Thünen appliquée à la ville	150
4.2.3. Problématiques de la nouvelle économie géographique	152
4.2.4. Des travaux à l'origine de nombreux modèles théoriques	153
4.3. Conclusion	154
Chapitre 5. Modèles des localisations géographiques	155
5.1. Les modèles monocentriques et polycentriques de von Thünen et d'Alonso.	156
5.2. Le modèle de Steiner généralise le modèle de Weber	158
5.3. Des modèles des places centrales en cours d'élaboration	160
5.4. Conclusion	161

Partie 3. Structures spatiales et dynamiques territoriales	163
Introduction de la partie 3.	165
Chapitre 6. Théoriser les structures et les dynamiques territoriales	167
6.1. De l'espace terrestre à l'espace géographique	167
6.1.1. L'espace présent dans toutes les disciplines	167
6.1.2. Une réalité : l'espace terrestre, un concept : l'espace géographique	168
6.1.3. Le territoire : une notion écologique transférée en géographie	169
6.2. Des théories disciplinaires pour expliquer des formes territoriales simples	170
6.2.1. Des structures spatiales gradient-linéaire imposées par la nature ou produites par les sociétés	170
6.2.2. De multiples théories pour expliquer les organisations territoriales polarisées	171
6.2.2.1. La polarisation des économistes	171
6.2.2.2. Centre et périphérie en science politique	172
6.2.2.3. Un emprunt à la physique : la théorie de la gravitation	172
6.2.2.4. D'autres processus pour expliquer des formes en auréoles.	172
6.2.2.5. Un modèle renouvelé par l'approche fractale	173
6.2.3. Trois théories des discontinuités dont une géographique.	173
6.2.3.1. Les discontinuités selon R. Brunet.	174
6.2.3.2. Discontinuités et autopoïèse selon Maturana et Varela	174
6.2.3.3. Les discontinuités de la théorie des catastrophes de Thom	175
6.3. De la morphologie à la morphogénie	177
6.3.1. Les mécanismes élémentaires de la morphogenèse : croissance, mouvement, émergence, brisure de symétrie	177
6.3.1.1. Les modèles théoriques de la production-croissance	177
6.3.1.2. Trois types de mouvement : diffusion, convection, turbulence	178
6.3.1.3. Caractérisation des fonctions, des structures et des formes par l'émergence.	181
6.3.1.4. Formes et brisures de symétrie.	182

6.4. Panorama des théories de la morphogenèse	183
6.4.1. La théorie de Schelling et les théories de l'interaction sociale. . .	183
6.4.2. La théorie de la réaction-diffusion et sa généralisation	185
6.4.3. La théorie des systèmes auto-organisés critiques	186
6.4.4. La théorie constructale de Béjan et ses prolongements	188
6.4.5. La théorie de la relativité d'échelle de Nottale	189
6.5. Conclusion	189
6.6. Annexe, dossier 5 : la mondialisation à l'origine d'un paradoxe : l'homogénéisation et la fracturation du monde.	190

Chapitre 7. Modèles de points et de champs 193

7.1. Modéliser les structures de points d'un espace géographique	193
7.1.1. Quatre catégories de questions	193
7.1.2. Observer et résumer une répartition de points : densité, centres moyen et médian	194
7.1.3. Tester la répartition aléatoire, régulière ou agglomérée des points	196
7.1.3.1. Une approche imparfaite : la technique des quadrats	197
7.1.3.2. Privilégier les outils testant la répartition de distances minimales	197
7.1.4. Dépendance spatiale : autocorrélation et variographie	199
7.1.4.1. Autocorrélation et variographie de données image	200
7.1.4.2. Autocorrélation de données ponctuelles ou aréales irrégulières : le test de Moran	201
7.1.4.3. Régressions et classifications de données territoriales autocorrélées	203
7.1.5. L'interpolation spatiale : créer des champs à partir de données ponctuelles	203
7.1.5.1. Interpolation par les surfaces de tendance	204
7.1.5.2. Interpolation par les polygones de Voronoï	206
7.1.5.3. Interpolation par des fonctions splines	207
7.1.5.4. Une méthode d'interpolation probabiliste : le krigeage	208
7.2. Modéliser les champs géographiques.	209
7.2.1. Quelques apports de disciplines voisines	209
7.2.1.1. Les apports de la morphométrie	209
7.2.1.2. Les apports de la cartographie	211
7.2.1.3. Les apports du traitement d'image et de la télédétection. . .	212
7.2.2. Etude globale des champs géographiques.	212
7.2.2.1. Formes gradients et analyse de tendance spatiale	213
7.2.2.2. Irrégularité, rugosité générale et fractalité de l'espace	213

7.2.2.3. Mesurer l'homogénéité et l'hétérogénéité globale d'une structure spatiale par la méthode entropique	215
7.2.3. Etude locale des champs géographiques	220
7.2.3.1. Deux stratégies pour reconnaître des formes locales : détection des contours et détection des régions	221
7.2.3.2. Un exemple d'application : les lignes structurantes de la ville de Nice	223
7.2.3.3. Qualifier les formes élémentaires	224
7.3. Conclusion	225
7.4. Annexe, dossier 6 : introduction à l'analyse morphométrique des Alpes grenobloises	226
Chapitre 8. Modèles de réseaux	229
8.1. Les deux facettes d'un réseau : graphes et matrices	229
8.1.1. De la représentation graphique d'un réseau...	230
8.1.2. ...à ses représentations matricielles	231
8.2. Modéliser la structure d'un réseau spatial	232
8.2.1. Centralité, hiérarchie, pouvoir et prestige dans un réseau	232
8.2.2. Cohésion et communautés d'un réseau	236
8.2.3. Vulnérabilité et résilience d'un réseau.	239
8.2.4. Trois modèles de structures réseau	241
8.3. Modèles géographiques qualitatifs et théorie des graphes	242
8.3.1. Modéliser les relations d'affiliation	242
8.3.2. Elaborer des modèles conceptuels	243
8.3.3. Modéliser les réseaux sociaux d'Internet	244
8.4. Modéliser la dynamique des réseaux	245
8.4.1. L'optimisation dans des réseaux stationnaires	245
8.4.1.1. Affectations et ordonnancement dans un réseau stable.	245
8.4.1.2. Le problème du voyageur de commerce ou du plus court chemin.	246
8.4.1.3. Le problème du coût minimal	247
8.4.1.4. Le problème du flot maximum	248
8.4.1.5. L'optimisation des files d'attente	249
8.4.2. L'évolution temporelle des réseaux	249
8.4.2.1. Tous les réseaux évoluent.	249
8.4.2.2. Modèles de croissance des réseaux	250
8.4.3. Modèles de mouvements canalisés par les réseaux	251
8.5. Conclusion	252
8.6. Annexe, dossier 7 : une approche géométrique du réseau des métropoles françaises	252

Chapitre 9. Modèles de l'espace géographique	257
9.1. Tester les liens entre deux structures spatiales élémentaires	257
9.1.1. Repérer les correspondances entre deux structures élémentaires du même type	258
9.1.1.1. Tester les relations entre deux ensembles points	258
9.1.1.2. Mesurer les relations entre deux champs	259
9.1.1.3. Tester l'isomorphie de deux réseaux	261
9.1.2. Les relations entre deux structures élémentaires différentes	262
9.1.2.1. Modéliser les relations entre un ensemble de points et un champ	263
9.1.2.2. Modéliser les relations entre un réseau et un ensemble de points	264
9.1.2.3. Modéliser l'interaction entre un réseau et un champ	265
9.2. Modéliser des structures spatiales compliquées : apprentissage automatique et chorèmes	265
9.2.1. Deux exemples de structures spatiales compliquées	266
9.2.2. Une chorématique renouvelée par l'apprentissage automatique	267
9.2.2.1. Une limite à contourner : la subjectivité des empilements de chorèmes élémentaires	267
9.2.2.2. Une solution : l'apprentissage automatique	267
9.2.2.3. Une étude de cas : la densité de la population française . . .	268
9.3. Modéliser les structures spatiales multi-échelles	270
9.3.1. Les modèles de décomposition en ondelettes d'une structure spatiale	270
9.3.2. Les modèles de décomposition de l'entropie d'information pour les données maillées	275
9.3.3. Les modèles multifractals	277
9.3.4. Comparer deux structures spatiales multi-échelles	280
9.4. Conclusion	281
 Chapitre 10. Macro et micro-modèles de la morphogénie	 283
10.1. Des séries chronologiques révélatrices de théories de la morphogénèse.	283
10.1.1. Tester le comportement chaotique d'une série chronologique	284
10.1.2. Tester la fractalité des données pour vérifier la théorie des systèmes auto-organisés critiques	285

10.1.3. Les comportements log-périodiques : un indicateur de la théorie de la relativité d'échelle	285
10.2. Modéliser la dynamique de systèmes territoriaux : des EDO aux EDP	286
10.2.1. Les ingrédients d'un système dynamique spatialisé	286
10.2.2. Des modèles pédagogiques	288
10.2.2.1. Le modèle de Burger : advection et diffusion d'une population constante	288
10.2.2.2. Des modèles pour simuler les interactions entre populations sur un territoire	290
10.2.2.3. Simuler un système dynamique par la méthode des éléments finis	292
10.2.2.4. Un exemple réaliste : la diffusion d'une innovation en France.	294
10.3. Automates cellulaires, mouvements browniens et systèmes multi-agents	295
10.3.1. Définition d'un automate cellulaire.	295
10.3.2. Les mouvements browniens pour simuler les déplacements	300
10.3.3. L'apport des systèmes multi-agents	304
10.3.4. Une modélisation universelle	306
10.3.5. Construire un micro-modèle de simulation	306
10.3.5.1. Ne pas oublier la troisième étape : analyser les résultats	307
10.3.5.2. La simulation de morphogenèses théoriques par des modèles d'automates cellulaires ou de systèmes multi-agents	307
10.3.6. Réflexions critiques sur l'emploi des AC et SMA	311
10.4. Conclusion	312
10.5. Annexe, dossier 8 : simuler la croissance urbaine sur la Côte d'Azur avec un modèle d'automates cellulaires	313
Conclusion	315
Bibliographie	317
Index	329