

# Table des matières

En hommage à Jacques Dubois (1931-2007).....	3
Préface d'Alain Le Méhauté .....	5
<b>Première partie. La géométrie trans-échelles</b>	<b>11</b>
<b>1 Un monde d'illusions et de vertiges</b> .....	<b>13</b>
1.1. Vertige cinétique de notre Univers à toutes les échelles .....	13
1.2. Vertige des géométries à travers les âges: d'Euclide à Mandelbrot.....	15
1.3. Fascination des fractales et des dynamiques trans-échelles .....	17
1.4. Remerciements.....	19
<b>Deuxième partie Les géométries de la Nature</b>	<b>21</b>
<b>2 Les géométries de la Nature, d'Euclide à Mandelbrot</b> .....	<b>23</b>
2.1. La géométrie d'Euclide: le monde apparent.....	23
2.2. Le livre de la Nature est-il écrit en langage mathématique? .....	24
2.3. De Galilée à Einstein, l'espace-temps devient courbe.....	25
2.4. La mécanique quantique: un monde quantifié aux petites échelles.....	27
2.5. D'Apollonius à Mandelbrot: des objets mathématiques non identifiés ...	29
2.6. L'espace-temps courbe devient aussi fractal: l'apport de Nottale.....	36
2.7. Fractales et thermodynamique: la voie multi-échelles .....	37
<b>Troisième partie Les lois de la Nature</b>	<b>43</b>
<b>3 Déterminisme, hasard, et chaos déterministe</b> .....	<b>45</b>
3.1. Le déterminisme.....	45
3.2. Le hasard et ses formes.....	46
3.3. Le chaos déterministe: l'effet papillon .....	49
3.4. Des lois de puissances à la notion de fractal .....	51
<b>4 Les fractales</b> .....	<b>53</b>
4.1. Les notions de mesures et de dimension .....	53
4.2. Mesure et dimension de Hausdorff.....	54
4.3. Les ensembles fractals.....	56
4.4. Le monde magique des itérations .....	63

<b>5</b>	<b>Les systèmes dynamiques, les espaces de phase et les attracteurs étranges</b> .....	67
5.1.	Les systèmes dynamiques .....	67
5.2.	Attracteurs aperiodiques, régime chaotique et attracteurs étranges.....	74
5.3.	Fonctions de corrélation et exposants de Lyapunov .....	77
5.4.	Le chaos .....	81
5.5.	Instabilités et auto-organisation des systèmes dynamiques.....	86
5.6.	Conclusion sur les systèmes dynamiques.....	92
<b>6</b>	<b>Fractalité dépendante d'échelle !</b> .....	95
6.1.	Fractalistes et trans-fractalistes : la naissance d'une nouvelle frontière en physique.....	97
<b>7</b>	<b>Entropie spatiale, diffusivité et dynamiques trans-échelles</b> .....	101
7.1.	Mesurer les limites et les déviations à la fractalité.....	102
7.2.	Spations et flux d'entropie spatiale entre spations .....	104
7.3.	Dynamique temporelle d'un système multi-échelles : la diffusivité trans-échelles .....	108
7.4.	Covariance d'échelle de la diffusivité trans-échelles.....	110
7.5.	Diffusivité trans-échelles en turbulence.....	111
7.6.	Temps de transfert d'information dans la cascade turbulente et mesure de la diffusivité trans-échelles .....	113
7.7.	Diffusivité trans-échelles dans les aérosols .....	114
7.8.	Dynamiques trans-échelles : une équation générale de diffusion pour l'entropie d'échelle .....	115
<b>8</b>	<b>Fractals paraboliques</b> .....	117
8.1.	Distributeurs constructals de fluide: des fractals paraboliques .....	119
8.2.	Fractalité parabolique des pannes de réseaux électriques.....	120
8.3.	Fractalité parabolique dans les aérosols.....	122
8.4.	Fractalité parabolique dans les gisements pétroliers.....	123
8.5.	Fractals paraboliques dans les écosystèmes.....	123
8.6.	Fractals paraboliques en géographie .....	125
8.7.	Convergence parabolique des grandes structures de galaxies vers l'homogénéité.....	126
<b>9</b>	<b>La théorie constructale : répartir et minimiser l'entropie dans l'espace des échelles</b> .....	131
9.1.	Construire à travers les échelles en minimisant la production d'entropie: <i>connecter un espace à un point</i> .....	132
9.2.	Définition d'un volume élémentaire soumis à une dualité cinétique.....	133
9.3.	Drainage de chaleur par drain conducteur.....	134
9.4.	Drainage de fluide.....	136
9.5.	Drainage de voyageurs.....	137
9.6.	Construire et optimiser dans l'espace des échelles: appairer les constructals élémentaires .....	138
9.7.	Conclusion.....	141

<b>10</b>	<b>Fractales et la théorie de la relativité d'échelle</b> .....	145
10.1.	L'échelle des échelles de la Nature .....	145
10.2.	Relativité d'échelle et origine des fractales.....	146
10.3.	Le principe de relativité d'échelle.....	147
10.4.	Équation de Schrödinger généralisée dans l'espace des échelles.....	150
10.5.	Les lois d'échelle .....	151
10.6.	Mécanique quantique généralisée.....	156
10.7.	Modèles de duplication en mécanique quantique .....	157
10.8.	Morphogenèse par l'équation de Schrödinger généralisée.....	159
10.9.	Relativité et fractalité du temps .....	162
<b>11</b>	<b>Fractales, phénomènes critiques et log-périodicité</b> .....	165
11.1.	Transitions de phases et phénomènes critiques.....	166
11.2.	Phénomènes critiques et la théorie de la relativité d'échelle.....	167
11.3.	Les lois log-périodiques.....	168
11.4.	Entre hasard et déterminisme: que décrivent les lois log-périodiques ?.....	171
 <b>Quatrième partie Quand la Nature se fait géomètre</b>		175
<b>12</b>	<b>Les fractales en cosmologie</b> .....	177
12.1.	Cosmologie fractale.....	178
12.2.	Nuit noire sous les étoiles: le paradoxe d'Olbers .....	178
12.3.	Distribution des galaxies: une convergence parabolique du fractal vers l'homogénéité.....	180
12.4.	Les vitesses relatives des paires de galaxies.....	181
12.5.	Vitesses et répartition des planètes dans le système solaire.....	181
12.6.	Distribution des exoplanètes hors du système solaire.....	183
12.7.	Les structures galactiques .....	184
12.8.	Morphologies des enveloppes d'étoiles.....	185
12.9.	La répartition des cratères de la Lune.....	187
<b>13</b>	<b>Fractales, multifractales et peaux entropiques en turbulence</b> ...	191
13.1.	Dynamique multi-échelles et intermittente de la turbulence .....	192
13.2.	La cascade d'énergie de Kolmogorov .....	193
13.3.	L'intermittence en turbulence: les limites de la théorie de Kolmogorov.....	195
13.4.	Décrire l'intermittence par les fractales .....	197
13.5.	Multifractales en turbulence: des singularités organisées en fractales..	198
13.5.	La dynamique des peaux entropiques .....	200
13.6.	Saisir et quantifier l'intermittence: entre <i>corps d'émergence</i> et <i>crête de convergence</i> .....	202
13.7.	Les <i>peaux fractales</i> de la turbulence .....	204
13.8.	Peaux entropiques et exposants d'intermittence en turbulence développée .....	205

<b>14 Croissance fractale et nombre d'or :</b>	
<b>les architectures du hasard</b> .....	209
14.1. Agrégation limitée par la diffusion :	
de la structure à partir du hasard.....	210
14.2. Une fractalité fuyante et insaisissable :	
la « dérive infinie » des arbres DLA.....	212
14.3. Croissance par les pointes :	
le centre gelé et la crête active des arbres DLA.....	213
14.4. Une hiérarchie de couches fractales entre	
la zone centrale et la couronne périphérique.....	213
14.5. Un dégradé en <i>peaux entropiques</i> :	
le <i>corps</i> et la <i>crête</i> des arbres DLA.....	215
14.6. Fibonacci et le nombre d'or dans les arbres DLA.....	216
14.7. Les peaux entropiques appliquées au DLA :	
le nombre d'or comme dimension fractale.....	219
14.8. Arbres DLA dans des espaces de dimensions supérieures :	
la théorie des peaux entropiques.....	220
<b>15 Fractales dans les flammes</b> .....	223
15.1. Coups de grisou dans les mines de charbon.....	223
15.2. Quelle est la forme d'une flamme?.....	224
15.3. Covariance d'échelle en combustion turbulente.....	226
15.4. Une dimension fractale magique en turbulence	
et en combustion turbulente?.....	228
<b>16 Les fractales en géosciences</b> .....	231
16.1. Fractales en physique du globe :	
la naissance d'une nouvelle discipline.....	231
16.2. La fragmentation et la fracturation des roches, la tectonique.....	234
16.3. Les séismes.....	239
16.4. Les volcans.....	246
16.5. Le géomagnétisme terrestre.....	252
<b>17 Les fractales du relief terrestre</b> .....	263
17.1. Le relief terrestre.....	263
17.2. L'océan.....	269
17.3. La banquise et les glaciers.....	271
17.4. La fonte de la banquise de l'océan Arctique.....	273
17.5. L'atmosphère.....	276
<b>18 Chocs et vibrations : amortir par les fractales</b> .....	285
18.1. La tempête de 1999 : un manque catastrophique de fractalité!.....	285
18.2. Des amortisseurs fractals.....	286
18.3. Instabilités dues au détachement tourbillonnaire.....	287
18.4. Des <i>grappins fractals</i> contre les vibrations	
des tubes dans les échangeurs.....	288

<b>19 Les fractales en paléontologie</b> .....	291
19.1. Première découverte de lois de puissance dans la distribution statistique des apparitions et extinctions d'espèces chez les rongeurs.....	291
19.2. Extension des recherches sur les fractales en paléontologie .....	293
19.3. La signification du temps critique .....	313
<b>20 Les peaux entropiques de l'arbre de la vie</b> .....	319
20.1. De l'arbre gradualiste de Darwin à l'arbre en «équilibres ponctuels».....	319
20.2. Log-périodicité temporelle de l'arbre de la vie.....	320
20.3. Dynamiques d'échelle, niches écologiques et évolution des espèces.....	322
20.4. Spatialiser l'arbre temporel de la vie: l'argument écosystémique.....	323
20.5. Principe de conservation du flux d'entropie à travers l'arbre de la vie...	324
20.6. Entre <i>corps d'émergence</i> et <i>crête de convergence</i> : estimer le facteur de réversibilité? .....	326
20.7. Les irréversibilités fractales de l'arbre de la vie.....	329
20.8. Arbre d'évolution pour une espèce donnée: variations du facteur d'irréversibilité .....	330
20.9. L'influence du corpus de dates retenues et du critère d'évolution .....	332
20.10. Dimensions fractales décroissantes à mesure que l'espèce évolue? Une interprétation en termes de dynamique écologique .....	334
20.11. La difficile pénétration du concept de fractales dans l'évolution du vivant .....	335
<b>21 Fractales dans le vivant</b> .....	339
21.1. Une structuration hiérarchique du vivant.....	340
21.2. Les formes fractales dans le vivant actuel.....	341
<b>Cinquième partie Les fractales dans les Sciences humaines et sociales</b>	371
<b>22 Les fractales en anthropologie et démographie humaine</b> .....	373
22.1. Les fractales en anthropologie.....	374
22.2. Log-périodicité et démographie .....	377
<b>23 Fractales en économie et en histoire des systèmes économiques</b> .....	383
23.1. Krachs boursiers et méthodes d'étude .....	383
23.2. Application de lois log-périodiques à l'évolution de la bourse .....	385
23.3. Évolution des systèmes économiques d'Europe occidentale.....	387
23.4. Les évolutions économiques de l'URSS et de la Chine .....	390
23.5. Le temps critique des civilisations d'Amérique centrale, un exemple de fin de civilisation? .....	391

<b>24</b>	<b>Fractales et dynamiques urbaines.....</b>	<b>395</b>
24.1.	Une nouvelle science: dynamique des foules en milieu urbain .....	395
24.2.	La marche humaine dépend de la taille des villes .....	397
24.3.	La locomotion humaine est fractale ! .....	397
24.4.	<i>Danses de la densité</i> : l'évitement fractal en milieu urbain .....	398
24.5.	Maîtriser et canaliser les mouvements de foule.....	399
24.6.	Conclusion: l'humain face aux risques et aux mutations urbaines.....	399
<b>25</b>	<b>Évolutions log-périodiques en histoire des sciences .....</b>	<b>401</b>
25.1.	Les accélérateurs de particules, du cyclotron au Grand Collisionneur de Hadrons du CERN.....	401
25.2.	Les découvertes des éléments chimiques.....	404
25.3.	Les remontées mécaniques pour les skieurs et la loi log-périodique .....	406
<b>26</b>	<b>Des histoires nationales à l'histoire universelle: l'Histoire fractale.....</b>	<b>409</b>
26.1.	Une morphologie de l'histoire universelle: l'histoire à grande échelle..	410
26.2.	<i>Les Études subalternes</i> : une Histoire aux petites échelles sous une colonisation d'échelle mondiale.....	411
26.3.	Histoire I et II: fleuves et affluents de l'Histoire .....	413
26.4.	Dépasser les historiographies coloniales et nationales: vers une Histoire globale de l'Anthropocène.....	414
26.5.	Des outils d'analyse historique fondés sur la géométrie fractale? .....	415
26.6.	Log-périodicité en histoire .....	415
<b>27</b>	<b>Les fractales dans les arts.....</b>	<b>425</b>
27.1.	Les fractales dans les arts graphiques .....	425
27.2.	La chronologie des courants artistiques suit-elle une loi log-périodique? .....	429
27.3.	Fractales en littérature et chaos déterministe au théâtre .....	431
27.4.	Les fractales dans le domaine de la musique.....	433
27.4.	Le zoom, les fractales et le cinéma.....	438
	<b>Sixième partie Conclusions</b>	<b>441</b>
<b>28</b>	<b>Les nouvelles alliances trans-échelles.....</b>	<b>443</b>
28.1.	De la relativité restreinte aux dynamiques d'échelles: ouvrir et explorer l'espace des échelles .....	443
28.2.	Dimensions négatives et lacunarité pointent vers la thermodynamique et les phénomènes dissipatifs .....	449
28.3.	Fractales et dynamiques trans-échelles: quelques perspectives .....	454
<b>29</b>	<b>Glossaire .....</b>	<b>463</b>