

Table des matières

Avant-propos	V
Sommaire	IX
Introduction	1
1^{re} Partie - Éléments de cinétique de croissance	
Chapitre 1 - Le phénomène de croissance - Une approche phénoménologique	9
1.1. Diversité du phénomène de « croissance »	9
1.2. Les types de courbes de croissance observées	12
1.2.1. Variation monotone de la variable en croissance	12
1.2.2. Phases de croissance	13
1.2.3. Croissance indéfinie	15
1.2.4. Croissance de type périodique	16
1.3. Analyse phénoménologique de la croissance	18
1.3.1. Approche phénoménologique	18
1.3.2. Forces internes et flux	20
1.3.3. Modèles globaux et modèles structurés	20
1.3.4. Distribution de l'activité de croissance	21
Annexe : Sur la mesure de la croissance	22
Chapitre 2 - Modèles autonomes - Problèmes de base	25
2.1. Fonction et modèle de croissance	25
2.1.1. Fonction de croissance	25
2.1.2. Modèle de croissance	26
2.1.3. Schémas associés à la fonction de croissance	27
2.2. Grandeurs cinétiques	28
2.2.1. Vitesses de croissance	28
2.2.2. Accélérations de croissance	33
2.2.3. Durée de croissance	34
2.3. Conditions initiales et phase de latence	34
2.3.1. Conditions initiales	34
2.3.2. Phase de latence	35

2.4. Structure temporelle de croissance	37
2.5. Régulation de la croissance.....	38
2.5.1. Différentes sortes de limitation.....	38
2.5.2. Régulation par activation-inhibition.....	39
2.5.3. Régulation exogène : croissance et ressources	40
2.5.4. Auto-régulation de la croissance.....	42
2.5.5. Modèles mixtes : l'âge comme « variable explicative ».....	44
2.6. Rythmes de croissance	44
2.6.1. Séries temporelles.....	44
2.6.2. Rythmes de croissance chez les végétaux.....	46
2.6.3. Fonctionnement rythmique du méristème apical caulinaire	47
2.6.4. Vers un modèle structuré.....	48
2.7. Allométrie de croissance	49
2.7.1. Relation allométrique de Huxley-Teissier	50
2.7.2. Extensions de la relation de Huxley-Teissier.....	53
2.7.3. Allométrie multivariée	54
2.7.4. Allométrie métabolique.....	55
2.8. Champ de croissance.....	57
2.9. Approche dite <i>fonctionnelle</i> de la croissance.....	57
2.10. Approche probabiliste de la croissance.....	58
2.10.1. Processus de Poisson	59
2.10.2. Processus binomial	60
Annexes.....	61
A.2.1. Stabilité des états stationnaires	61
A.2.2. L'âge comme variable explicative	
Approche thermodynamique de la croissance.....	64
A.2.3. Sur la variable temps : temps physique <i>versus</i> temps biologique ?.....	67

2^e Partie - Croissance indéfinie

Chapitre 3 - La loi exponentielle et ses extensions	77
3.1. Croissance exponentielle	77
3.1.1. Hypothèses.....	78
3.1.2. Fonction de croissance.....	78
3.1.3. Interprétation.....	79
3.1.4. Propriétés	80
3.1.5. Exemples.....	81
3.2. Croissance linéaire	84
3.2.1. Hypothèses.....	84
3.2.2. Interprétation.....	85

3.2.3. Fonction de croissance.....	85
3.2.4. Propriétés.....	85
3.2.5. Exemples.....	86
3.3. Croissance en puissance du temps.....	87
3.3.1. Hypothèse.....	87
3.3.2. Interprétation.....	87
3.3.3. Fonction de croissance.....	88
3.3.4. Propriétés.....	88
3.3.5. Exemples.....	89
3.4. Exponentielle d'une puissance du temps.....	90
3.4.1. Hypothèse.....	90
3.4.2. Fonction de croissance.....	91
3.4.3. Propriétés.....	91
3.4.4. Exemples.....	92
3.5. Extension de la loi exponentielle.....	93
3.5.1. Hypothèse.....	93
3.5.2. Fonction de croissance.....	93
3.6. Modèles asymptotiques.....	94

3^e Partie - Croissance limitée : modèles sigmoïdes

Chapitre 4 - Premiers modèles asymptotiques

Loi de Mitscherlich 1 et modèles dérivés.....	99
4.1. Loi de Mitscherlich 1 - Fonction exponentielle négative, courbe de croissance sans point d'inflexion.....	99
4.1.1. Hypothèses.....	100
4.1.2. Interprétation.....	100
4.1.3. Fonction de croissance.....	102
4.1.4. Propriétés.....	102
4.1.5. Diagramme de croissance.....	104
4.1.6. Exemples.....	105
4.2. Double exponentielle négative (fonction de Gregory).....	106
4.2.1. Hypothèse et interprétation.....	106
4.2.2. Fonction de croissance.....	107
4.2.3. Propriétés.....	107
4.2.4. Exemple.....	108
4.3. Modèle de Chapman-Richards.....	109
4.3.1. Propriétés.....	109
4.3.2. Structure temporelle de croissance.....	110
4.3.3. Exemples.....	110

4.4. Loi de Weibull.....	111
4.4.1. Forme 1 de la fonction de Weibull.....	112
4.4.2. Forme 2 de la fonction de Weibull.....	115
Chapitre 5 - Théorie logistique de la croissance.....	121
5.1. La fonction de Verhulst ou logistique simple.....	121
5.1.1. Hypothèses.....	121
5.1.2. Interprétations.....	122
5.1.3. Fonction de croissance.....	127
5.1.4. Propriétés.....	129
5.1.5. Structure temporelle de croissance.....	133
5.1.6. Exemples.....	136
5.2. Extension de la fonction de Verhulst.....	140
5.2.1. Une nécessité expérimentale.....	140
5.2.2. Logistique avec asymptote inférieure $y = K_1 \neq 0$	141
5.3. Logistiques à paramètres variables.....	143
5.3.1. Paramètres variables avec le temps.....	144
5.3.2. Logistique et disponibilité en ressources.....	144
5.3.3. Logistique et morphogenèse.....	145
5.4. Logistiques avec effet retard.....	147
5.4.1. Retard discret sur le terme de freinage : la logistique de Hutchinson-Cunningham.....	148
5.4.2. Retard sur le terme agoniste.....	150
5.4.3. Retard distribué.....	151
Annexes.....	152
A.5.1. La fonction logistique, modèle d'optimalité de croissance.....	152
A.5.2. Les paradoxes de l'équation logistique.....	153
Chapitre 6 - Logistiques généralisées.....	157
6.1. Logistique de Pearl-Reed.....	157
6.1.1. Hypothèses.....	157
6.1.2. Fonction de croissance.....	158
6.1.3. Interprétation.....	159
6.1.4. Propriétés.....	159
6.1.5. Exemples.....	160
6.2. Equation de vitesse polynomiale de Richards-Robertson.....	161
6.3. Logistique de Richards.....	162
6.3.1. Hypothèses.....	162
6.3.2. Interprétation.....	163
6.3.3. Fonction de croissance.....	164
6.3.4. Propriétés.....	166

6.3.5. Structure temporelle de croissance	169
6.3.6. Extensions.....	171
6.3.7. Exemples.....	172
6.4. Logistique de Birch.....	174
6.5. Fonction de Blumberg (hyperlogistique) - Le système <i>Evolon</i>	175
6.5.1. Hypothèse	175
6.5.2. Interprétation.....	176
6.5.3. Fonction de croissance.....	176
Chapitre 7 - Fonction de Gompertz.....	181
7.1. Hypothèses	181
7.2. Interprétation.....	182
7.2.1. Cinétique cellulaire : transition d'états	182
7.2.2. Analogie catalytique	183
7.2.3. Croissance organique : interprétation probabiliste	184
7.3. Fonction de croissance.....	184
7.4. Propriétés	185
7.5. Structure temporelle de croissance	188
7.6. Exemples.....	189
Chapitre 8 - Allométrie métabolique et croissance - Théorie de Bertalanffy	191
8.1. Les principales relations allométriques en physiologie	192
8.1.1. Le facteur d'échelle allométrique a	192
8.1.2. Le facteur de proportionnalité k	194
8.2. Signification des relations d'allométrie métabolique.....	195
8.3. Théorie de Bertalanffy	196
8.3.1. Types de métabolisme et types de croissance	197
8.3.2. Le modèle général.....	201
8.3.3. Relation entre l'équation de Bertalanffy et d'autres lois de croissance.....	203
8.4. Modèle de West, Brown et Enquist.....	204
Annexes.....	205
A.8.1. Compléments sur l'allométrie métabolique	205
A.8.2. Le modèle de Weiss et Kavanau	208
Chapitre 9 - Autres modèles sigmoïdes	209
9.1. Fonction de Johnson-Schumacher	209
9.2. Fonction de Korf ou de Lundqvist-Matern	209
9.2.1. Fonction de croissance.....	210
9.2.2. Propriétés	210
9.2.3. Exemples.....	212

9.3. Fonction de Jolicœur 1	212
9.3.1. Propriétés	213
9.3.2. Structure temporelle de croissance	214

4^e Partie - Croissance limitée : modèles non-sigmoïdes

Chapitre 10 - Modèles asymptotiques non-sigmoïdes.....	217
10.1. Fonctions de Preece et Baines.....	217
10.1.1. Hypothèses.....	217
10.1.2. Fonctions de croissance	218
10.1.3. Propriétés	218
10.1.4. Structure temporelle de croissance	219
10.1.5. Exemple	220
10.2. Modèle de Jolicœur-Pontier-Pernin-Sempé	220
10.3. Autres modèles.....	222
10.4. Vers une somme de composantes sigmoïdes	224
Chapitre 11 - Fonctions non-monotones. Croissance - Décroissance	225
11.1. Loi de Mitscherlich 2	225
11.2. Modèle intégró-différentiel de Volterra-Kostitzin.....	226
11.2.1. Hypothèse	226
11.2.2. Fonction de croissance.....	227
11.2.3. Propriétés	228
11.2.4. Exemples.....	229
11.3. Modèle mixte de Peleg.....	230
11.4. Modèle de Jolicœur-Pontier	231
Annexe : Solution de l'équation de Volterra-Kostitzin.....	233

5^e Partie - Autonomie et croissance-dépendance

Chapitre 12 - Croissance substrat-dépendante.....	237
12.1. Hypothèses communes aux modèles substrat-dépendants.....	238
12.2. Modèle de Teissier	239
12.2.1. Hypothèse	239
12.2.2. Fonction de croissance.....	240
12.3. Modèle de Monod en milieu non-renouvelé.....	240
12.3.1. Hypothèse	240
12.3.2. Fonction de croissance.....	241
12.3.3. Exemples.....	243
12.3.4. Le modèle de Monod comme modèle avec retard.....	243

12.4. Le modèle de Monod pour cultures en continu (chémostat).....	244
12.4.1. Hypothèse	244
12.4.2. Stabilité	245
12.4.3. Conservativité	246
12.4.4. Prise en compte de la maintenance	246
12.4.5. Prise en compte d'une mortalité	247
12.4.6. Autres fonctions de saturation.....	247
12.4.7. Compétition entre différents substrats	249
12.5. Modèle mixte : croissance exponentielle et substrat-dépendance	249
12.6. Modèles mixtes : substrat- et densité-dépendances	250
12.6.1. Le modèle de Contois	250
12.6.2. Le point de vue de la dynamique des populations	251
12.6.3. Logistique et nutrition.....	253
12.7. Modèle de radiation-dépendance	254
12.8. Modèle de Droop	255
Extensions du modèle de Droop	257
Chapitre 13 - Croissance densité-dépendante	259
13.1. La croissance comme processus de relaxation.....	259
13.1.1. Hypothèse	260
13.1.2. Propriétés	260
13.1.3. Croissance et fonction potentiel ϕ	262
13.2. Système dynamique $\{y, \mu\}$	263
Le cas de la croissance logistique	264
13.3. Effet Allee	269
13.3.1. « Effet Allee faible »	270
13.3.2. « Effet Allee fort »	272
13.4. Cinétique de croissance et compétition.....	273
13.4.1. Relation d'auto-éclaircissage.....	274
13.4.2. Modèle de croissance-compétition d'Aikman et Watkinson (1980).....	278
13.4.3. Cinétique densité-dépendante	279
Annexe : Notion de fonction potentiel.....	281
Chapitre 14 - Autocatalyse et croissance	283
14.1. Systèmes de transformation d'un processus autocatalytique.....	285
14.1.1. Généralités sur les systèmes de transformation	285
14.1.2. Systèmes de transformation avec autocatalyse	286
14.2. Fonctions de croissance autocatalytique.....	287
14.2.1. Type 1 : croissance par autocatalyse seule.....	288
14.2.2. Type 2 : croissance par autocatalyse et compétition conjointes	288

Chapitre 15 - Modèles biomécaniques de croissance	291
15.1. Modèle de croissance cellulaire de Lockhart.....	291
15.1.1. Hypothèses.....	292
15.1.2. Fonction de croissance.....	293
15.1.3. Interprétation.....	295
15.1.4. Exemples.....	297
15.2. Extensions du modèle de Lockhart	299
15.2.1. Variation du point critique de turgescence Y	299
15.2.2. Variation de l'extensibilité pariétale	301
15.3. Croissance distribuée d'un axe végétal.....	302
Le modèle de McCoy et Boersma.....	303
15.4. Modèles mécaniques de croissance organique.....	305
15.4.1. Hypothèses.....	306
15.4.2. Equation de vitesse de croissance.....	306
15.4.3. Exemple	307
15.5. Biomécanique de la croissance et morphogénèse.....	307
Annexes.....	309
A.15.1. Cinétique de la relaxation pariétale.....	309
A.15.2. Sur la mesure des propriétés mécaniques de la paroi	310

6^e Partie - Synopsis des modèles autonomes de croissance

Chapitre 16 - Vue coordonnée des principales fonctions de croissance : vers un formalisme général ?	313
16.1. Théorie de Turner.....	314
16.1.1. Hypothèses.....	315
16.1.2. Fonction générique de croissance	315
16.1.3. Exemples.....	316
16.2. Généralisation de la logistique de Richards.....	317
16.3. La fonction versatile de croissance de Schnute	318
16.4. La logistique généralisée de Tsoularis et Wallace.....	319
16.4.1. Hypothèse	319
16.4.2. Fonction générique de croissance	319
16.4.3. Propriétés	320
16.5. Autres présentations synoptiques.....	322
16.6. Base générique d'interprétation	324
16.6.1. Les systèmes de Savageau	325
16.6.2. Vers un modèle métabolique.....	327

7^e Partie - La croissance, processus spatio-temporel

Chapitre 17 - Champ de croissance	333
17.1. Croissance unidimensionnelle	335
17.1.1. Vitesse spécifique de croissance élémentaire en conditions stationnaires.....	336
17.1.2. Croissance non-stationnaire.....	344
17.1.3. Croissance locale et métabolisme.....	345
17.1.4. Modèles mixtes : croissance position- et âge-dépendante.....	346
17.2. Croissance bidimensionnelle	347
17.2.1. Un exemple de dysharmonie de croissance	347
17.2.2. Vitesse spécifique de croissance élémentaire.....	349
17.2.3. Représentation lagrangienne et métabolisme	354
17.2.4. Structures bidimensionnelles polarisées	356
17.3. Croissance tridimensionnelle.....	356
Propriétés d'un champ de croissance 3D.....	358
17.4. Biomécanique de la croissance locale.....	364
17.5. Non-stationnarité du champ de croissance : oscillations de croissance.....	365
Annexe : Système naturel de coordonnées curvilignes.....	369
Chapitre 18 - Modèles de croissance-diffusion-convection	371
18.1. Les équations de base de la diffusion.....	373
18.1.1. Marche aléatoire	373
18.1.2. Les lois fondamentales de diffusion	373
18.1.3. Solution de l'équation de diffusion.....	374
18.1.4. Diffusion en dimension 1.....	375
18.1.5. Diffusion en dimension 2.....	377
18.1.6. Diffusion en dimension 3.....	377
18.2. Croissance-diffusion	378
18.2.1. Croissance exponentielle	378
18.2.2. Croissance logistique	382
18.3. Croissance et systèmes de réaction-diffusion	385
18.3.1. Modèle de croissance à 1 morphogène.....	386
18.3.2. Modèle mécano-chimique.....	387
18.3.3. Régulation du fonctionnement du méristème apical caulinaire	388
18.4. Croissance-diffusion-convection	391
18.4.1. Population cellulaire en milieu liquide.....	392
18.4.2. Systèmes racinaires <i>in situ</i>	392
18.5. Croissance avec diffusion et transport actif : le cas du gravimorphisme.....	394
Modèle de Forest-Demongeot	395

8^e Partie - La croissance, processus intégré

Chapitre 19 - Modèles composites	399
19.1. Croissance d'une population stratifiée	399
19.2. Croissance multiphasique	400
19.2.1. Modèle multilogistique : somme de logistiques non-synchrones.....	401
19.2.2. Modèle diauxique de Liquori-Tripiciano	406
Chapitre 20 - Vers les modèles structurés de croissance	409
20.1. Structuration de l'organisme végétal en croissance.....	410
20.1.1. La notion de série organique.....	411
20.1.2. Modèle multilogistique	412
20.2. Croissance cellulaire : modèles à compartiments	419
20.2.1. Modèle de croissance à deux compartiments : cellules actives/cellules quiescentes (Piantadosi, 1985)	419
20.2.2. Modèle de croissance algale en chémostat	421
20.3. Croissance d'une population structurée : structuration discrète	423
20.3.1. Fonctions de croissance des L-systèmes.....	425
20.3.2. Cellules méristématiques avec division cellulaire symétrique	426
20.3.3. Cellules méristématiques avec division cellulaire dissymétrique : 1 caractère	427
20.3.4. Cellules méristématiques avec division cellulaire dissymétrique : 2 caractères.....	433
20.3.5. Dissymétrie de la division cellulaire et sénescence	435
20.3.6. Croissance limitée.....	436
20.3.7. Cinétique de la croissance et cycle cellulaire	442
20.3.8. Croissance à 2 et 3 dimensions	444
20.4. Croissance d'une population structurée : structuration continue.....	445
20.4.1. Cinétique temps-âge : structure d'âge	445
20.4.2. Cinétique temps-maturation.....	450
20.4.3. Cinétique temps-taille : structure de taille	454
20.4.4. Structuration et compartimentation cellulaire.....	455
20.5. Systèmes de Savageau	457
20.5.1. Exemples.....	458
20.5.2. Le modèle <i>Evolon</i>	459
Annexe : Cinétique cellulaire statistique	462
Chapitre 21 - Analyse factorielle de la croissance	467
21.1. Le modèle des composantes principales	470
21.2. Les équations fondamentales	472

21.3. Représentation des individus	474
21.4. Représentation des variables.....	476
21.5. Structures factorielles des variables.....	479
21.5.1. Caractéristiques des structures factorielles	479
21.5.2. Interprétation et représentation	480
21.5.3. Exemples.....	481
21.6. Analyse factorielle sur une fonction de croissance	485
Annexe : Multiplicateurs de Lagrange.....	485
Références.....	487
Chapitre 22 - Optimalité du processus de croissance	489
22.1. Le principe du travail minimal.....	491
22.1.1. La loi de ramification de Murray	491
22.1.2. Optimalité du transport vasculaire et allométrie métabolique	494
22.1.3. Exemples.....	496
22.2. Contrôle optimal de la croissance	498
22.2.1. Optimalité des fonctions de croissance ?	498
22.2.2. Modèle de Cohen (1971)	498
22.2.3. Durée de croissance et temps de commutation.....	501
22.2.4. Bases d'un modèle de contrôle optimal de croissance végétale	503
Annexes.....	521
A.22.1. Dynamique lagrangienne et dynamique hamiltonienne.....	521
A.22.2. Contrôle optimal d'un système dynamique	525
Conclusion.....	537
Glossaire.....	541
Bibliographie générale.....	549
Index.....	571