

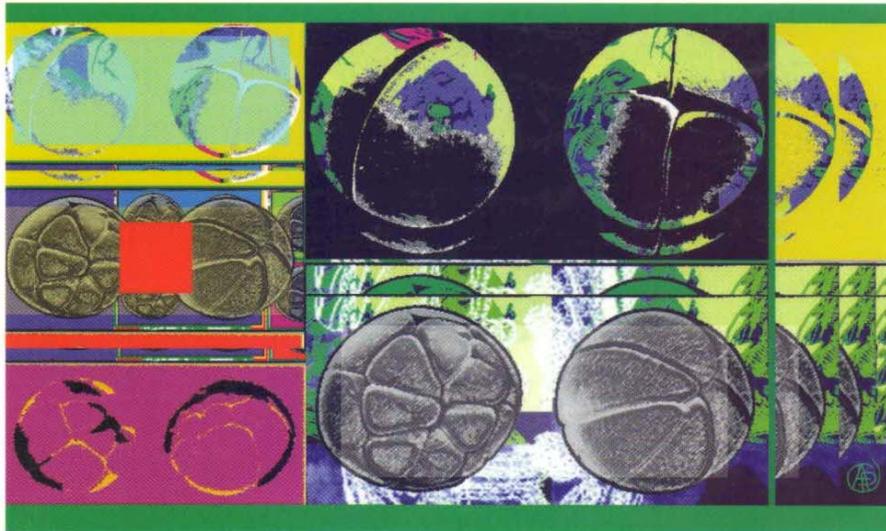
Lewis Wolpert

**Rosa Beddington • Jeremy Brockes • Thomas Jessell
Peter Lawrence • Elliot Meyerowitz**

2^e CYCLE • CAPES • AGRÉGATION

Biologie du développement

Les grands principes



Préface de Nicole M. Le Douarin

DUNOD

Sommaire

Préface à l'édition française	v
Préface de l'auteur	vii
Sommaire détaillé	xi
Remerciements	xvii
Crédits des illustrations	xviii
Chapitre 1 : Historique et concepts de base	1-22
Les origines de la biologie du développement	3
Les outils conceptuels	9
Chapitre 2 : Systèmes modèles	23-60
Organismes modèles : les vertébrés	25
Organismes modèles : les invertébrés	43
Organismes modèles : les plantes	49
Identification des gènes de développement	52
Chapitre 3 : Construction du plan d'un vertébré	
I : axes et feuilletts embryonnaires	61-96
Mise en place des axes du corps	63
Origine et détermination des feuilletts embryonnaires	75
Chapitre 4 : Construction du plan d'un vertébré	
II : mésoderme et système nerveux	97-124
Formation et régionalisation des somites	98
Rôle de la région de l'organisateur et induction neurale	110
Chapitre 5 : La mise en place du plan d'organisation de la drosophile	125-170
Les gènes maternels déterminent les axes du corps	127
Détermination des axes de polarité au cours de l'ovogenèse	136
Les gènes zygotiques ont une action morphogène sur le jeune embryon	139
Mise en place des segments : activation des gènes pair-rule	146
Gènes de polarité segmentaire et compartiments	150
Gènes sélecteurs et homéotiques dans les segments	161
Chapitre 6 : Développement des invertébrés, des ascidies et des myxomycètes	171-202
Némathelminthes	173
Mollusques	180
Annélides	183
Échinodermes	186
Ascidies	193
Myxomycètes	196
Chapitre 7 : Le développement des plantes	203-230
Développement embryonnaire	204
Méristèmes	213
Mise à fleur	221

Chapitre 8 : Morphogenèse : changement de forme chez l'embryon précoce	231-268
Adhésion cellulaire	232
Segmentation et formation de la blastula	235
Gastrulation	242
Formation du tube neural	254
Migration cellulaire	256
Dilatation orientée	262
Chapitre 9 : Différenciation cellulaire	269-302
Réversibilité et transmission des profils d'activité des gènes	271
Contrôle de l'expression spécifique des gènes	281
Modèles de différenciation cellulaire	287
Chapitre 10 : Organogenèse	303-338
Le développement du membre de poulet	304
Les disques imaginaux des insectes	320
L'œil composé des insectes	328
La vulve de <i>Caenorhabditis</i>	332
Le développement du rein	334
Chapitre 11 : Développement du système nerveux	339-370
Spécification de l'identité des cellules dans le système nerveux	340
Guidage des neurones	352
Survie des neurones, formation des synapses et mise au point	360
Chapitre 12 : Lignée germinale et reproduction sexuée	371-398
Détermination du phénotype sexuel	372
Développement des cellules germinales	382
Fécondation	390
Chapitre 13 : Régénération	399-416
Morphallaxie	401
Épimorphose	405
Chapitre 14 : Croissance et développement postembryonnaire	417-442
Croissance	418
Mues et métamorphoses	432
Vieillesse et sénescence	437
Chapitre 15 : Évolution et développement	443-462
Modifications du développement au cours de l'évolution	444
Modifications du facteur temps au cours du développement	456
Glossaire	463-470
Index	471-479

Sommaire détaillé

Chapitre 1: Historique et concepts de base

Les origines de la biologie du développement	3-9
1.1 C'est Aristote qui, le premier, a cerné les problèmes de l'épigenèse et de la préformation	3
Encadré 1A – Étapes fondamentales du développement de <i>Xenopus laevis</i>	4
1.2 La théorie cellulaire a modifié les conceptions du développement embryonnaire et de l'hérédité	5
1.3 Œufs mosaïque et œufs à régulation	6
1.4 La découverte de l'induction	8
1.5 La rencontre de la génétique et de la biologie du développement	8
Les outils conceptuels	9-22
1.6 Le développement implique des divisions cellulaires, l'émergence d'une structure, des changements de forme, des différenciations cellulaires et la croissance	9
Encadré 1B – Les feuillettes embryonnaires	11
1.7 Le comportement cellulaire est le lien entre l'action des gènes et le développement	12
1.8 Les gènes contrôlent le comportement de la cellule par celui des protéines qu'elle a fabriquées	13
1.9 L'activité différentielle des gènes contrôle le développement	14
1.10 Le développement est progressif et le devenir des cellules peut se trouver déterminé plus ou moins tôt	15
1.11 Des inductions peuvent engendrer des différences entre les cellules	17
1.12 La réponse d'une cellule aux signaux inducteurs dépend de son état	18
1.13 La construction d'un organisme peut inclure l'interprétation d'une information spatiale	19
1.14 L'inhibition latérale peut engendrer des motifs périodiques	20
1.15 La localisation de déterminants cytoplasmiques et des divisions asymétriques peuvent introduire des différences entre les cellules	20
1.16 L'embryon contient un programme plus générateur que descriptif	21

Chapitre 2: Systèmes modèles

Organismes modèles: les vertébrés	25-43
2.1 Amphibiens: <i>Xenopus laevis</i>	26
Encadré 2A – Formation des globules polaires	27
2.2 Oiseaux: le poulet	31
2.3 Mammifères: la souris	37
2.4 Le poisson-zèbre	41

Organismes modèles: les invertébrés	43-49
2.5 La drosophile <i>Drosophila melanogaster</i>	43
2.6 Le nématode <i>Caenorhabditis elegans</i>	47
Organismes modèles: les plantes	49-52
2.7 <i>Arabidopsis thaliana</i>	50
Identification des gènes de développement	52-57
2.8 Des gènes de développement peuvent être identifiés à partir de mutations spontanées rares	53
2.9 Identification des gènes de développement par induction et repérage de mutations	54
Encadré 2B – Mutagenèse et protocole de criblage en vue de l'identification des mutations affectant le développement chez <i>Drosophila</i>	56

Chapitre 3: Construction du plan d'un vertébré I: axes et feuillettes embryonnaires

Mise en place des axes du corps	63-75
3.1 L'axe de polarité animal-végétatif est à déterminisme maternel	63
Encadré 3A – Signaux protéiques intercellulaires	64
Encadré 3B – Détection <i>in situ</i> de l'expression des gènes	65
3.2 L'axe dorso-ventral des embryons d'amphibiens est déterminé par le point d'entrée du spermatozoïde	66
3.3 Le centre de Nieuwkoop est déterminé par la rotation corticale	68
3.4 Des protéines maternelles à effets dorsalisant et ventralisant ont été identifiées	69
3.5 L'axe dorso-ventral du blastoderme de poulet est déterminé par rapport au vitellus et l'axe antéro-postérieur par rapport à la gravité	70
3.6 Les axes de la souris sont déterminés par des interactions entre cellules	71
3.7 La spécification des organes internes asymétriques suppose des mécanismes particuliers	73
3.8 La dissymétrie des organes chez les vertébrés est sous contrôle génétique	73
Origine et détermination des feuillettes embryonnaires	75-93
3.9 Pour construire une carte des territoires présomptifs, on suit le devenir de cellules marquées	75
3.10 Les cartes des territoires présomptifs des vertébrés sont des variations sur un même thème	77
3.11 Le devenir des cellules chez les jeunes embryons de vertébrés n'est pas encore déterminé	79
Encadré 3C – Les souris transgéniques	81
3.12 Chez le xénope, le mésoderme est induit par des signaux provenant de la région végétative	82

3.13 Le mésoderme est induit par un signal diffusible au cours d'une période limitée de compétence	83
3.14 La chronologie de l'expression des gènes spécifiques du mésoderme est déterminée par un mécanisme intrinsèque	84
3.15 Plusieurs signaux induisent et assurent la morphogenèse du mésoderme dans la blastula du xénope	85
3.16 L'origine des signaux inducteurs du mésoderme	86
3.17 On a identifié des candidats comme signaux inducteurs chez le xénope	87
3.18 Le mésoderme produit lui-même les facteurs de sa morphogenèse	89
3.19 L'expression des gènes zygotiques commence chez le xénope à la transition blastulienne	90
3.20 L'induction du mésoderme active des gènes qui le modèlent	91
3.21 Des signaux protéiques avec gradients et des réponses à seuil pourraient être à l'origine de la morphogenèse du mésoderme	92

Chapitre 4: Construction du plan d'un vertébré II: mésoderme et système nerveux

Formation et régionalisation des somites	98-110
4.1 Les somites se forment dans un ordre bien défini le long de l'axe antéro-postérieur	98
4.2 Le devenir des cellules des somites est déterminé par des signaux provenant des cellules voisines	100
4.3 L'identité de position des somites le long de l'axe antéro-postérieur est spécifiée par l'expression des gènes Hox	102
Encadré 4A – Gènes à homéoboîtes	104
4.4 Délétion ou surexpression des gènes Hox peuvent entraîner des modifications dans la régionalisation de l'axe	106
4.5 L'acide rétinoïque peut modifier les valeurs de position	107
Encadré 4B – Ciblage de gènes: mutation par insertion et knock-out	108
Rôle de la région de l'organisateur et induction neurale	110-121
4.6 L'organisateur peut déterminer la formation d'un nouvel axe antéro-postérieur	110
4.7 La plaque neurale est induite par le mésoderme	113
4.8 La régionalisation du système nerveux peut être déterminée par des signaux provenant du mésoderme	114
4.9 Les signaux qui assurent la détermination de la plaque neurale peuvent se déplacer à l'intérieur de cette plaque	116
4.10 Le cerveau postérieur est segmenté en rhombomères par des frontières de restriction clonale	117
4.11 Les cellules des crêtes neurales ont des valeurs de position	119
4.12 Des gènes Hox sont à l'origine de l'identité de position dans la région du cerveau postérieur	119
4.13 Au stade neurula, l'embryon s'organise autour de régions formatrices d'organes encore capables de régulation	121

Chapitre 5: La mise en place du plan d'organisation de la drosophile

Les gènes maternels déterminent les axes du corps	127-135
5.1 Trois classes de gènes maternels déterminent l'axe antéro-postérieur	128
5.2 Le gène <i>bicoid</i> crée un gradient morphogène antéro-postérieur	129
5.3 La morphogenèse dans la partie postérieure de l'animal est contrôlée par des gradients des protéines Nanos et Caudal	131
5.4 Les deux extrémités de l'embryon sont spécifiées par l'activation de récepteurs membranaires	132
5.5 La polarité dorso-ventrale de l'œuf est spécifiée par la localisation de protéines maternelles dans l'enveloppe vitelline	133
5.6 La protéine Dorsal fournit l'information de position le long de l'axe dorso-ventral	134
Détermination des axes de polarité au cours de l'ovogenèse	136-138
5.7 Les axes antéro-postérieur et dorso-ventral de l'ovule sont spécifiés par des interactions entre les cellules folliculaires	136
Les gènes zygotiques ont une action morphogène sur le jeune embryon	139-146
5.8 L'expression des gènes zygotiques le long de l'axe dorso-ventral est contrôlée par la protéine Dorsal	139
5.9 La protéine Decapentaplegic agit comme morphogène dans la région dorsale	141
5.10 L'axe antéro-postérieur est divisé en grandes régions par l'expression des gènes gap	142
5.11 La protéine Bicoid donne un signal de position pour l'expression de <i>hunchback</i> dans la zone antérieure	143
Encadré 5A – Mouches transgéniques	144
5.12 Le gradient de la protéine Hunchback active et réprime d'autres gènes gap	144
Mise en place des segments: activation des gènes pair-rule	146-150
5.13 Les parasegments sont délimités par l'expression de gènes pair-rule selon un motif périodique	146
5.14 L'activité des gènes gap détermine la position des bandes d'expression des gènes pair-rule	148
Gènes de polarité segmentaire et compartiments	150-161
5.15 L'expression du gène <i>engrailed</i> détermine une restriction clonale et définit un compartiment	151
Encadré 5B – Mosaïque génétique et recombinaison mitotique	153
5.16 Les gènes de polarité segmentaire structurent les segments et stabilisent les frontières des segments et des parasegments	155
5.17 Les frontières des compartiments interviennent dans l'organisation et la polarisation des segments	157
5.18 La morphogenèse peut se faire différemment selon les insectes	158

Gènes sélecteurs et homéotiques dans les segments	161-166	6.17 Des signaux chimiques dirigent la différenciation chez les myxomycètes	199
5.19 Les gènes sélecteurs homéotiques du complexe bithorax sont responsables de la diversification des segments postérieurs	162		
5.20 Le complexe Antennapedia contrôle la spécification des régions antérieures	164		
5.21 L'ordre d'expression des gènes HOM correspond à leur ordre sur le chromosome	164		
5.22 L'expression des gènes HOM dans le mésoderme viscéral contrôle la structure de l'intestin adjacent	165		
Chapitre 6: Développement des invertébrés, des ascidies et des myxomycètes			
Nématelminthes	173-180		
6.1 Les axes de polarité sont déterminés par les divisions cellulaires asymétriques et par les interactions entre cellules	173		
6.2 Les interactions entre cellules déterminent leur devenir chez l'embryon jeune de <i>C. elegans</i>	176		
6.3 Un petit complexe de gènes à homéoboîte détermine le devenir des cellules le long de l'axe antéro-postérieur	177		
6.4 Les gènes contrôlent une information progressive dans le temps au cours du développement de <i>C. elegans</i>	178		
Mollusques	180-183		
6.5 La détermination du sens de la segmentation spirale est d'origine maternelle	181		
6.6 Chez les mollusques, les axes du corps sont déterminés lors des premières divisions	181		
Annélides	183-186		
6.7 Les téloblastes sont déterminés par la présence de facteurs cytoplasmiques	183		
6.8 L'organisation antéro-postérieure et la segmentation de la sangsue sont liées à un mécanisme de lignage	184		
Échinodermes	186-192		
6.9 L'ovule d'oursin est polarisé le long de l'axe animal-végétatif	187		
6.10 L'axe dorso-ventral chez l'oursin dépend du plan de la première division	188		
6.11 La carte des territoires spécifiques de l'oursin est finement déterminée, et pourtant, il existe de grandes possibilités de régulation	189		
6.12 La région végétative de l'embryon d'oursin joue le rôle d'un organisateur	190		
6.13 Les gènes de développement de l'oursin présentent des régions régulatrices complexes et modulaires	191		
Ascidies	193-196		
6.14 La spécification des muscles peut être due à des facteurs cytoplasmiques locaux	194		
6.15 Une induction est indispensable pour le développement de la corde	195		
Myxomycètes	196-199		
6.16 La construction du stade pluricellulaire suppose un tri des cellules et un repérage de position	197		
		Chapitre 7: Le développement des végétaux	
		Développement embryonnaire	204-213
		7.1 Des courants électriques interviennent dans la polarisation du zygote de <i>Fucus</i>	205
		7.2 Au début du développement de <i>Fucus</i> , le devenir des cellules est déterminé par la paroi cellulaire	206
		7.3 Chez l'embryon de <i>Volvox</i> , des divisions inégales engendrent des différences de taille qui pourraient être à l'origine de la spécification des cellules	207
		7.4 Divisions asymétriques et position des cellules interviennent dans la morphogenèse au début du développement des plantes à fleurs	208
		Encadré 7A – Embryogenèse des angiospermes	209
		7.5 La morphogenèse de certaines régions de l'embryon d' <i>Arabidopsis</i> peut être altérée par des mutations	210
		7.6 Les cellules somatiques des plantes peuvent donner naissance à des embryons et à des plantules	211
		Méristèmes	213-221
		7.7 Le devenir d'une cellule dans le méristème caulinaire dépend de sa position	214
		7.8 Le développement des méristèmes dépend de signaux émis par la plante	217
		Encadré 7B – Plantes transgéniques	218
		7.9 La position des feuilles et la phyllotaxie font intervenir l'inhibition latérale	218
		7.10 Des tissus racinaires se forment à partir des méristèmes racinaires selon un schéma très stéréotypé de divisions cellulaires	219
		Mise à fleur	221-228
		7.11 Des gènes homéotiques contrôlent l'identité des organes de la fleur	221
		7.12 La transformation du méristème caulinaire en méristème floral est contrôlée par des gènes et par l'environnement	226
		7.13 L'organogenèse de la fleur d' <i>Antirrhinum</i> se fait dans le sens dorso-ventral et radialement	226
		7.14 La couche interne du méristème peut spécifier l'organogenèse du méristème	227
		Chapitre 8: Morphogenèse: changement de forme chez l'embryon précoce	
		Adhésion cellulaire	232-235
		8.1 Le tri qui s'effectue au sein de cellules dissociées traduit les différences d'adhérence entre les différents tissus	232
		Encadré 8A – Les molécules d'adhésion cellulaire	233
		8.2 Les cadhérines peuvent permettre une spécificité d'adhésion	234

Segmentation et formation de la blastula	235-242	9.3 L'état différencié d'une cellule peut être modifié par transdifférenciation	274
8.3 Les asters de l'appareil mitotique déterminent le plan de division de la cellule	236	9.4 La différenciation des cellules sécrétrices d'anticorps est due à des transformations irréversibles de leur ADN	276
8.4 Les cellules des blastulas jeunes de souris et d'oursin acquièrent une polarité	238	9.5 Le maintien et la transmission de profils d'activité des gènes peut dépendre de protéines régulatrices, ainsi que de modifications structurales et chimiques de l'ADN	277
8.5 Le transport d'ions intervient dans l'accumulation de liquide dans le blastocèle	240	Contrôle de l'expression spécifique des gènes	281-296
8.6 Des cavités internes peuvent être créées par la mort de cellules	241	9.6 Des régulateurs de transcription généraux et spécifiques d'un tissu interviennent dans le contrôle de la transcription	282
Gastrulation	242-253	9.7 Des signaux externes peuvent activer des gènes	284
8.7 La gastrulation chez l'oursin fait intervenir des migrations cellulaires et une invagination	243	Modèles de différenciation cellulaire	287-299
Encadré 8B – Changements de forme et mouvements des cellules	244	9.8 Une famille de gènes peut activer les transcriptions spécifiques du muscle	287
8.8 L'invagination du mésoderme chez la drosophile est due à un changement dans la forme des cellules, changement contrôlé par les gènes qui définissent l'axe dorso-ventral	246	9.9 La différenciation des cellules musculaires suppose un arrêt des cycles cellulaires	288
8.9 La gastrulation du xénope implique différents mouvements de cellules	247	9.10 Des combinaisons complexes de facteurs de transcription contrôlent la différenciation cellulaire	289
8.10 Extension convergente et épibolie sont dues à une intercalation des cellules	249	9.11 Toutes les cellules du sang dérivent de cellules-souches polyvalentes	290
8.11 L'allongement de la corde est due à l'intercalation cellulaire	252	9.12 Des facteurs stimulant la croissance de colonies et des changements intrinsèques contrôlent la différenciation des lignées hématopoïétiques	291
Formation du tube neural	254-256	9.13 L'expression du gène de la globine est contrôlée par des séquences régulatrices situées à distance en amont de son locus	293
8.12 La formation du tube neural est dirigée par des forces internes et externes	254	9.14 Les cellules des crêtes neurales se différencient en plusieurs types cellulaires	295
8.13 Des changements dans le profil d'expression des molécules d'adhésion accompagnent la formation du tube neural	255	9.15 Des hormones stéroïdes et des facteurs de croissance polypeptidiques déterminent les cellules chromaffines et les neurones sympathiques	297
Migration cellulaire	256-262	9.16 La diversification des crêtes neurales implique des signaux tant pour la spécification du devenir des cellules que pour la sélection des cellules qui survivent	297
8.14 La migration dirigée des cellules du mésenchyme primaire de l'oursin est déterminée par les contacts entre les filopodes et la paroi du blastocèle	257	9.17 La mort programmée des cellules est sous contrôle génétique	298
8.15 La migration des cellules des crêtes neurales est contrôlée par des signaux extérieurs et par des différences d'adhérence	258		
8.16 L'agrégation chez les myxomycètes fait intervenir chimiotactisme et propagation d'un signal	260		
Dilatation orientée	262-265		
8.17 Chez <i>Caenorhabditis elegans</i> , le raccourcissement tangentiel des cellules hypodermiques provoque l'allongement de l'embryon	263		
8.18 Chez les végétaux, la direction de l'augmentation de taille au niveau cellulaire peut déterminer la forme d'une feuille	263		
Chapitre 9: Différenciation cellulaire		Chapitre 10: Organogenèse	
Réversibilité et transmission des profils d'activité des gènes	271-281	Le développement du membre de poulet	304-319
9.1 Des noyaux de cellules différenciées peuvent permettre le développement de l'ovule	272	10.1 Le membre de vertébré se développe à partir d'un bourgeon	305
9.2 Les profils d'activité des gènes dans les cellules différenciées peuvent être modifiés par fusion cellulaire	273	10.2 Le réalisation du patron du membre implique une information de position	305
		10.3 La crête apicale mésodermique induit la zone de détermination progressive	307
		10.4 La zone d'activité polarisante spécifie la position le long de l'axe antéro-postérieur	308
		10.5 La position le long de l'axe proximo-distal peut être spécifiée par le facteur temps	311
		10.6 L'axe dorso-ventral est contrôlé par l'ectoderme	312
		10.7 Des interprétations différentes des mêmes signaux de position conduisent à des membres différents	312
		10.8 Des gènes à homéoboîte interviennent dans la construction du patron des membres et dans la spécification de leur position	313

10.9 Une auto-organisation peut intervenir dans la réalisation du patron du membre 315

10.10 La morphologie du muscle est déterminée par le tissu conjonctif 316

Encadré 10A – Mécanismes de réaction-diffusion 317

10.11 La phase initiale du développement du cartilage, des muscles et des tendons se fait de façon autonome 318

10.12 La séparation des doigts résulte d'une mort programmée des cellules 318

Les disques imaginaux des insectes 320-327

10.13 Des signaux provenant de la frontière entre les compartiments antérieur et postérieur modèlent le disque imaginal alaire 321

10.14 La frontière dorso-ventrale de l'aile agit comme un centre organisateur 322

10.15 Le disque de la patte se structure comme celui de l'aile, sauf en ce qui concerne l'axe proximo-distal 323

10.16 Les taches colorées des papillons sont organisées à partir de champs de position supplémentaires 324

10.17 L'identité de segment des disques imaginaux est déterminée par des gènes homéotiques sélecteurs 325

L'œil composé des insectes 328-331

10.18 Des signaux assurent la progression du sillon morphogène, et la disposition des ommatidies se fait par inhibition latérale 329

10.19 La différenciation des cellules au sein de l'ommatidie dépend d'interactions cellulaires 329

10.20 Le développement de R7 dépend d'un signal issu de R8 330

10.21 L'activation du gène *eyeless* peut initier le développement de l'œil 331

La vulve de *Caenorhabditis* 332-334

10.22 La cellule-ancre induit les devenirs primaire et secondaire 333

Le développement du rein 334-336

10.23 Le développement du bourgeon urétéral à partir du canal de Wolff et des néphrons à partir du mésenchyme implique une induction 334

Chapitre 11: Développement du système nerveux

Spécification de l'identité des cellules dans le système nerveux 340-352

11.1 Les neurones de la drosophile proviennent d'agrégats préneurax 340

11.2 L'inhibition latérale détermine la position des précurseurs neuronaux 342

11.3 Des divisions cellulaires asymétriques interviennent dans le développement des organes sensoriels chez la drosophile 343

11.4 Le système nerveux des vertébrés se forme à partir de la plaque neurale 344

11.5 La spécification des précurseurs des neurones chez les vertébrés fait intervenir l'inhibition latérale 345

11.6 Le plan de différenciation des cellules le long de l'axe dorso-ventral de la corde est sous la dépendance de signaux ventraux et dorsaux 346

11.7 Les neurones du système nerveux central proviennent de divisions asymétriques, puis s'écartent de la zone de prolifération 348

Guidage des neurones 352-360

11.8 Les motoneurones issus de la moelle épinière établissent des connexions spécifiques avec les muscles 353

11.9 Le cône de croissance contrôle le trajet de l'axone lors de sa croissance 354

11.10 Le trajet choisi par un axone dépend des données de l'environnement et de l'identité du neurone 355

11.11 Les neurones issus de la rétine établissent des connexions avec le toit optique (tectum) pour former une zone de projection rétino-tectale 356

11.12 Les axones peuvent être guidés par des agents diffusibles 358

Survie des neurones, formation des synapses et mise au point 360-368

11.13 Bon nombre de neurones meurent au cours de l'innervation du membre 361

11.14 La survie des neurones dépend d'une compétition entre les facteurs neurotrophiques 361

11.15 Des actions réciproques entre le nerf et le muscle interviennent dans la formation de la jonction neuromusculaire 362

11.16 La topographie des voies nerveuses entre l'œil et le cerveau est affinée par l'activité nerveuse 365

11.17 La capacité de régénération des axones matures de vertébrés est limitée aux nerfs périphériques 367

Chapitre 12: Lignée germinale et reproduction sexuée

Détermination du phénotype sexuel 372-381

12.1 Le gène de départ pour la détermination du sexe chez les mammifères est situé sur le chromosome Y 372

12.2 Chez les mammifères, le phénotype sexuel est régulé par des hormones libérées par les gonades 373

12.3 Chez la drosophile, le premier signal de la détermination du sexe est le nombre de chromosomes X et elle se fait cellule à cellule 374

12.4 Le phénotype sexuel somatique de *Caenorhabditis* est déterminé par le nombre de chromosomes X 376

12.5 La plupart des plantes à fleurs sont hermaphrodites, mais certaines donnent des fleurs unisexuées 377

12.6 La détermination du sexe au niveau de la lignée germinale peut dépendre de signaux cellulaires et de la constitution génétique 378

12.7 Il existe différentes stratégies pour assurer l'ajustement génique des gènes situés sur le chromosome X 379

Développement des cellules germinales 382-390

12.8 Le devenir des cellules germinales peut être spécifié par un cytoplasme particulier dans l'ovule 382

12.9 Le cytoplasme polaire est localisé à la partie postérieure de l'ovule de drosophile	384	14.4 Des organes peuvent avoir un programme intrinsèque de développement	424
12.10 Les cellules germinales migrent depuis leur lieu d'origine vers les gonades	384	14.5 La croissance des os longs se fait au niveau des cartilages de conjugaison	424
12.11 Au cours de la différenciation des cellules germinales, il y a réduction du nombre des chromosomes	385	14.6 La croissance du muscle strié des vertébrés dépend de la tension	426
12.12 Le développement des ovocytes peut faire intervenir l'amplification de certains gènes et des contributions d'autres cellules	387	14.7 Les épithéliums de la peau et du tube digestif des mammifères sont renouvelés en permanence par des cellules provenant de cellules-souches	426
12.13 Les gènes contrôlant la croissance embryonnaire sont à effet parental	388	14.8 Un cancer peut être le résultat de mutations affectant des gènes qui contrôlent la multiplication et la différenciation cellulaires	428
Fécondation	390-395	14.9 Les hormones peuvent contrôler de nombreux aspects de la croissance des végétaux	431
12.14 La fécondation fait intervenir des interactions de surface entre ovule et spermatozoïde	391	14.10 L'auxèse est essentielle à la croissance des végétaux	432
12.15 Des changements membranaires lors de la fécondation de l'ovule empêchent la polyspermie	392	Mues et métamorphoses	432-436
12.16 Une onde de calcium déclenchée par la fécondation entraîne l'activation de l'ovule	393	14.11 Les arthropodes doivent muer pour grandir	433
		14.12 La métamorphose est contrôlée par l'environnement et les hormones	434

Chapitre 13: Régénération

Morphallaxie	401-405
13.1 La croissance de l'hydre est continue, avec perte de cellules à l'extrémité et par bourgeonnement	401
13.2 La régénération chez l'hydre est polarisée et peut se faire sans croissance préalable	402
13.3 La région apicale joue le rôle d'un centre organisateur et inhibe la formation d'une nouvelle zone équivalente	402
13.4 La régénération de la région apicale chez l'hydre peut s'interpréter à partir de deux gradients	403
Épimorphose	405-414
13.5 La régénération d'un membre de vertébré implique une dédifférenciation cellulaire et une croissance	406
13.6 La blastème du nerf donne naissance à des structures ayant des valeurs de position distales par rapport au site d'amputation	408
13.7 L'acide rétinolique peut changer les valeurs de position proximo-distales dans des membres en cours de régénération	410
13.8 Dans la patte d'insecte, des valeurs intermédiaires de position peuvent s'intercaler par croissance le long de l'axe proximo-distal et par croissance tangentielle	412
13.9 Chez les plantes, la régénération est polarisée du fait du transport orienté de l'auxine	413

Chapitre 14: Croissance et développement postembryonnaire

Croissance	418-432
14.1 Les tissus peuvent croître par prolifération ou par agrandissement des cellules, ou encore par accréation	418
14.2 La prolifération cellulaire peut être contrôlée par un programme intrinsèque et par des signaux externes	419
14.3 Des hormones de croissance sont indispensables à la croissance des mammifères	421

Viellissement et sénescence	437-439
14.13 Les gènes peuvent modifier la date d'apparition de la sénescence	438
14.14 En culture, les cellules vieillissent	439

Chapitre 15: Évolution et développement

Modifications du développement au cours de l'évolution	444-455
15.1 Certaines structures embryonnaires ont acquis de nouvelles fonctions au cours de l'évolution	445
15.2 Les membres chirodiens se sont formés à partir de nageoires	446
15.3 Les développements des ailes de vertébrés et d'insectes font intervenir des mécanismes qui ont été conservés par l'évolution au cours du temps	449
15.4 Les complexes Hox ont évolué par répétition en tandem des gènes	450
15.5 Des changements dans la spécification et l'interprétation de l'identité de position ont engendré l'élaboration du plan d'organisation des vertébrés et des arthropodes	451
15.6 La position et le nombre des appendices pairs des insectes dépend de l'expression des gènes Hox	453
15.7 Le plan d'organisation des arthropodes et des vertébrés est similaire, mais l'axe dorso-ventral est inversé	454
Modifications du facteur temps au cours du développement	456-460
15.8 Des changements différentiels des taux de croissance peuvent modifier la forme des organismes	456
15.9 L'évolution de l'histoire de chaque espèce a des incidences sur le développement	457
15.10 Au cours de l'évolution, il y a eu des modifications affectant le facteur temps	458