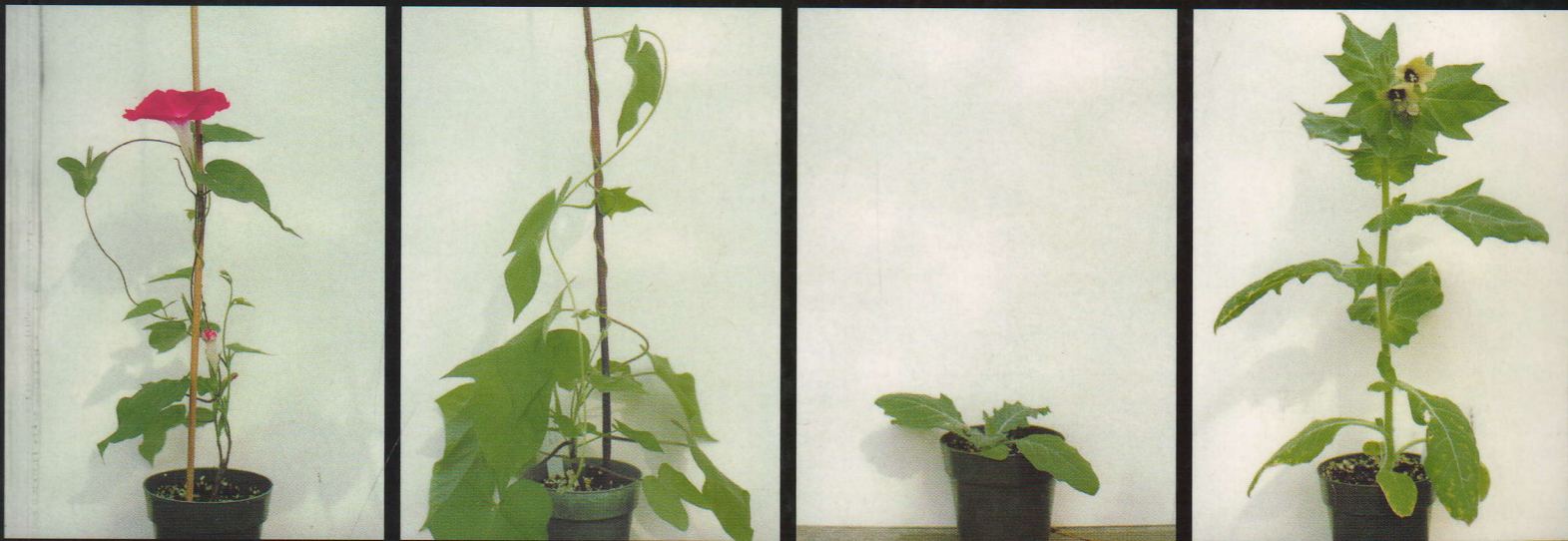


PHYSIOLOGIE VÉGÉTALE

• HOPKINS •



Traduction de la 2^e édition américaine par Serge Rambour
Révision scientifique de Charles-Marie Evrard

Table des matières

Chapitre 1

Introduction : l'organisation des plantes et des cellules végétales	1
L'objectif de la physiologie végétale	1
La cellule végétale	1
Les membranes biologiques	3
La bicouche membranaire	3
Les protéines membranaires	4
Les organites cellulaires	6
LE RÉTICULUM ENDOPLASMIQUE ET L'APPAREIL DE GOLGI	7
LES MITOCHONDRIES	9
LES PLASTES	9
LES MICROCORPUSCULES (MICROBODIES)	9
LES RIDOSOMES	10

Le cytosquelette	10
La matrice extracellulaire	11
La paroi primaire	12
La paroi secondaire	14
Les plasmodesmes	14
Cellules et tissus	15
L'ÉPIDERME	16
LES PARENCHYMES	16
LES TISSUS DE SOUTIEN	17
LES TISSUS CONDUCTEURS	17
Les organes de la plante	17
LES RACINES	17
LES TIGES	18
LES FEUILLES	18

PREMIÈRE PARTIE

Les plantes, l'eau et les sels minéraux	21
--	----

Chapitre 2

Les cellules végétales et l'eau	23
Eau et liaisons hydrogène	24
Les propriétés physico-chimiques de l'eau	25
Les propriétés thermiques	25
TEMPÉRATURE ET ÉTAT PHYSIQUE	25
ABSORPTION ET DISSIPATION DE LA CHALEUR	25
FUSION ET ÉVAPORATION DE L'EAU	25
L'eau comme solvant	26
Cohésion et adsorption	27
Le transport de l'eau	27
Le flux en masse	27
La diffusion	28
L'osmose — la diffusion de l'eau	28
Osmose et potentiel chimique	29
Le concept de potentiel hydrique	31
Les composantes du potentiel hydrique	31
Le mouvement de l'eau dans les cellules et les tissus	32
Quel est le degré d'élasticité de la paroi cellulaire ?	34

La transpiration	38
Le mécanisme	38
La mesure de la transpiration	39
La force motrice de la transpiration	39
L'influence de l'humidité, de la température et de la vitesse du vent sur la transpiration	40
EFFET DE L'HUMIDITÉ	41
EFFET DE LA TEMPÉRATURE	41
L'EFFET DU VENT	42
L'efficacité de la transpiration	44
L'anatomie de la conduction d'eau	44
L'ascension de la sève	46
La poussée racinaire	47
L'ascension de l'eau par capillarité	49
La théorie de la cohésion	49
LE MOTEUR DU MOUVEMENT	49
LE MAINTIEN DE LA COLONNE D'EAU	51
Les racines, le sol et l'absorption d'eau	54
Le sol : un milieu complexe	54
L'absorption de l'eau par les racines	55
Les racines, la moitié cachée	55
Les zones d'absorption de la racine	56
Le mouvement transversal de l'eau dans la racine	56

Chapitre 3

Les relations hydriques dans la plante entière	37
---	----

Chapitre 4

Les plantes et les nutriments inorganiques 61

L' étude des besoins en éléments minéraux
des plantes 62

Les éléments nutritifs essentiels 64

Les éléments bénéfiques 66

Le sodium 66

Le silicium 67

Le cobalt 67

Le sélénium 67

Rôle des nutriments et symptômes de carence 67

L' azote 68

Le phosphore 69

Le potassium 69

Le soufre 70

Le calcium 70

Le magnésium 70

Le fer 70

Le bore 73

Le cuivre 73

Le zinc 73

Le manganèse 73

Le molybdène 74

Le chlore 74

Le nickel 74

La toxicité des microéléments 75

Chapitre 5

Racines, sols et absorption des nutriments 77

Le sol, réservoir de nutriments 77

Le transport dans les membranes 79

La diffusion simple 80

La diffusion facilitée 80

Protéines de transport — transporteurs et canaux 81

Transport actif 81

L'accumulation sélective d'ions 81

Gradients électrochimiques et mouvement des ions 84

Transport actif et pompes électrogènes 86

Les aquaporines 88

L'absorption des ions par les racines 89

Diffusion et espace libre apparent 89

Le cheminement radial des ions,
le mouvement dans les racines 90

Les interactions racine-microorganismes 92

Les bactéries 92

Les mycorhizes 93

Chapitre 6

Les plantes et l'azote 99

Le cycle de l'azote 99

Ammonification, nitrification et dénitrification 100

La fixation de l'azote 100

La fixation biologique de l'azote 101

Les fixateurs libres de l'azote 101

Les fixateurs symbiotiques 101

La fixation symbiotique d'azote

chez les légumineuses 102

Infection et développement du nodule 102

LE STADE PRÉCOCE — COLONISATION ET INITIATION DU NODULE 102

INVASION DU POIL ABSORBANT ET CORDON D'INFECTION 105

LA LIBÉRATION DES BACTÉRIES 106

Biochimie de la fixation d'azote 106

La dinitrogénase 106

Le coût énergétique de la fixation d'azote 107

Dinitrogénase et oxygène 107

Dinitrogénase et production d'hydrogène 108

La génétique de la fixation d'azote 112

L'assimilation de l'azote 113

L'assimilation de l'ammonium 113

Exportation de l'azote fixé dans les nodules 114

L'assimilation du nitrate 116

La mobilisation de l'azote 117

La nutrition azotée : aspects agronomiques
et écologiques 118

DEUXIÈME PARTIE

Plantes, énergie et carbone 123

Chapitre 7

Lumière et pigments :
une introduction à la photobiologie 125

La nature physique de la lumière 125

La lumière, un phénomène ondulatoire 126

La lumière, un flux de particules 127

Absorption et devenir de l'énergie lumineuse 127

Spectres d'absorption et d'action 129

La mesure de la lumière	130
L'environnement radiant naturel	131
Les photorécepteurs	133
Les chlorophylles	133
Les phycobilines	134
Les caroténoïdes	135
Le cryptochrome	137
Les récepteurs de l'UV-B	138
Les flavonoïdes	138
Les bétacyanines	140

Chapitre 8

Les feuilles et la photosynthèse	143
La photosynthèse chez les algues et les hépatiques	144
La photosynthèse dans les feuilles	147
L'absorption de la lumière par les feuilles	147
Les feuilles et les échanges gazeux	149
Diffusion à travers les pores	151
Le mécanisme de fermeture / ouverture du stomate	152
Le contrôle des mouvements du stomate	154
LUMIÈRE ET DIOXYDE DE CARBONE	155
STATUT HYDRIQUE ET TEMPÉRATURE	156
LES RYTHMES CIRCADIENS	157
Le chloroplaste	157
Ultrastructure et compartimentation biochimique des chloroplastes	158
Le métabolisme non photosynthétique du chloroplaste	159

Chapitre 9

Bioénergétique et réactions photochimiques de la photosynthèse	163
Bioénergétique – les transformations de l'énergie dans les organismes vivants	164
Conservation de l'énergie, ordre et désordre	164
Energie libre et équilibre chimique	165
Énergie libre et réactions d'oxydoréduction	168
Un modèle de synthèse d'ATP	170
La conservation de l'énergie dans la photosynthèse	172
La photosynthèse, une réaction d'oxydoréduction	172
Le transport photosynthétique d'électrons	173
Les photosystèmes et les centres réactionnels	173
Le photosystème II et l'oxydation de l'eau	177
Les cytochromes et le photosystème I	178
Les photophosphorylations	179
L'hétérogénéité latérale de la chaîne de transport d'électrons	180

Complexes collecteurs de lumière et dynamique de la régulation de la photosynthèse	181
Le rôle des caroténoïdes dans la photosynthèse	183
Le transport d'électrons et le contrôle des mauvaises herbes	185

Chapitre 10

La photosynthèse : le métabolisme du carbone	189
Le cycle photosynthétique de la réduction du carbone (CPR)	190
La réaction de carboxylation	190
La consommation d'énergie dans le cycle de Calvin	193
LA RÉDUCTION DU 3-PGA	193
RÉGÉNÉRATION DE L'ACCEPTEUR	194
L'ÉNERGÉTIQUE DU CYCLE DE CALVIN	195
Activation et régulation du cycle de Calvin	195
L'autocatalyse	195
La régulation de l'activité de la Rubisco	196
La régulation des autres enzymes du cycle de Calvin	197
La photorespiration et le cycle photosynthétique d'oxydation du carbone	197
La RUBP oxygénase et la voie en C ₂ du glycolate	198
Pourquoi la photorespiration ?	199
Le métabolisme des plantes en C₄	200
Découverte et particularités du métabolisme des plantes en C ₄	201
L'anatomie de type Kranz	203
Signification écologique du métabolisme en C₄	204
Le métabolisme crassulacéen (CAM = crassulacean acid metabolism)	206
La voie CAM est-elle une variante du métabolisme en C ₄ ?	207
Signification écologique du métabolisme CAM	207
Régulation des photosynthèses en C₄ et CAM	208
Exportation et stockage des produits de la photosynthèse	208
La synthèse de l'amidon dans le chloroplaste	209
La synthèse du saccharose	210
Saccharose ou amidon, le devenir des trioses phosphate	211

Chapitre 11

Transport et distribution des photoassimilats	215
Le transport des photoassimilats	215
Composition des exsudats phloémiens	217
La structure du tissu phloémien	218

La protéine P et la callose	220
Sources et puits	221
Le mécanisme du transport dans le phloème	221
Chargement et déchargement du phloème	224
Le chargement du phloème	224
Le déchargement du phloème	226
La distribution des assimilats	227
L'allocation du carbone	228
MÉTABOLISME DE LA FEUILLE ET BIOMASSE	228
MISE EN RÉSERVE	228
L'EXPORTATION DES FEUILLES	229
La distribution des assimilats entre les puits	229
Le transport des composés xénobiotiques	231

Chapitre 12

Respiration cellulaire : récupération de l'énergie des photoassimilats	235
La respiration cellulaire, aperçu général	236
Dégradation du saccharose et de l'amidon	236
L' α -amylase	237
La β -amylase	237
La dextrinase limite	238
L' α -glucosidase	238
L'amidon phosphorylase	238
La glycolyse	238
L'entrée des hexoses dans la glycolyse	239
Conversion du fructose-1,6-bisphosphate en pyruvate	239
La voie oxydative des pentoses phosphates	240
Le sort du pyruvate	241
La respiration oxydative	241
La mitochondrie	241
Le cycle de l'acide citrique	242
Oxydation du NADH et du FADH ₂	243
Gradient de protons et synthèse d'ATP	245
Les voies alternatives de transport d'électrons chez les plantes	246
La NADPH déshydrogénase externe	246
La NADH déshydrogénase insensible à la rotenone	247
La respiration résistante au cyanure	247
Les huiles végétales, le cycle glyoxylique et la néoglucogénèse	248
Respiration et production de matériaux de construction	249

La respiration dans des organes et dans des plantes entières	251
Les facteurs qui influencent la respiration	252
La lumière	252
La température	252
La disponibilité en oxygène	253

Chapitre 13

Assimilation du carbone et productivité	255
La productivité	255
Respiration et économie du carbone	256
Les facteurs qui influencent la photosynthèse et la productivité	257
La lumière	257
La disponibilité en dioxyde de carbone	258
La température	259
Le potentiel hydrique du sol	260
Apport de nutriments, pathologies et polluants	261
Les facteurs foliaires	261
Production primaire à l'échelle mondiale	263

Chapitre 14

Molécules et métabolisme	267
Métabolites primaires et secondaires	267
Les terpénoïdes	268
Biosynthèse des terpènes	269
Terpénoïdes et herbivores	269
Stéroïdes et stérols	269
Les polyterpènes	272
Les hétérosides	273
Les saponosides	273
Les hétérosides cardioroniques	274
Les hétérosides cyanogènes	275
Les glucosinolates	275
Les composés phénoliques	276
La voie de l'acide shikimique	276
Les composés phénoliques simples	278
Les coumarines	279
La lignine	280
Les flavonoïdes	280
Les tanins	280
Les alcaloïdes	281

TROISIÈME PARTIE

Régulation du développement des plantes

Chapitre 15

Modes de développement des plantes	287
Croissance, différenciation et développement	287
Contrôle de la croissance et du développement	289
Contrôle générique du développement	289
Régulation du développement par les hormones	293
Régulation du développement par l'environnement	293
Le développement des plantes, résumé	294
Structure et développement des graines	294
La germination des graines	294
Le développement de la pousse feuillée	295
Développement de la racine	298
Evocation florale et développement	300
Développement des fleurs et des fruits	301
Comment la croissance cellulaire s'effectue-t-elle ?	302
Analyse cinétique de la croissance	304
La croissance de microorganismes en culture	304
Croissance d'organismes pluricellulaires	305

Chapitre 16

Le rôle des hormones dans le développement d'une plante	309
Le concept d'hormone chez les plantes	309
Les hormones végétales	313
Les auxines	313
Auxines naturelles et synthétiques	314
Rôle physiologique des auxines	315
<i>CROISSANCE CELLULAIRE ET DIFFÉRENCIATION</i>	315
Le développement des tiges et des racines	316
<i>CROISSANCE DES BOURGEONS AXILLAIRES</i>	316
<i>L'ABSCISSION DES FEUILLES</i>	317
<i>ALLONGEMENT DES RACINES ET DÉVELOPPEMENT</i>	317
<i>DÉVELOPPEMENT DES FLEURS ET DES FRUITS</i>	318
Les gibbérellines	320
Les effets des gibbérellines sur la physiologie des plantes	321
<i>CONTRÔLE DE L'ALLONGEMENT DES TIGES</i>	321
<i>LES PLANTES NAINES</i>	321
<i>LES PLANTES EN ROSETTE</i>	322
<i>L'INHIBITION DE LA CROISSANCE DES TIGES</i>	323
<i>LA GERMINATION DES GRAINES</i>	323
<i>LA FLORAISON</i>	324
Les cytokinines	325
Rôles physiologiques des cytokinines	326
<i>DIVISION CELLULAIRE ET MORPHOGENÈSE</i>	326
<i>MODILISATION DES NUTRIMENTS ET SÉNESCENCE</i>	327

AUTRES EFFETS DES CYTOKININES

L'acide abscissique	
Les rôles physiologiques de l'acide abscissique	
L'éthylène	
Rôles physiologiques de l'éthylène	
<i>DÉVELOPPEMENT VÉGÉTATIF</i>	
<i>LE DÉVELOPPEMENT DES FRUITS</i>	
<i>LA FLORAISON</i>	
Les polyamines	
Des hormones végétales putatives	
Autres molécules ayant une activité biologique	

Chapitre 17

Biochimie et mode d'action des hormones	
Comment les hormones agissent-elles ?	
Cas des hormones végétales	
Les protéines qui lient les hormones chez les plantes	
<i>LES RÉCEPTEURS DE L'AUXINE</i>	
<i>LES PROTÉINES QUI LIENT LES CYTOKININES</i>	
<i>LES PROTÉINES QUI LIENT LES GIBBÉRELLINES ET L'ACIDE ABCISSIQUE</i>	
Les messagers secondaires des plantes	
<i>LE CALCIUM</i>	
<i>LES PHOSPHOINOSITIDES</i>	
Hormones et activité des gènes	
Biosynthèse, transport et métabolisme des hormones	
Biosynthèse et métabolisme de l'auxine	
La biosynthèse de l'AIA	
Les conjugués de l'AIA	
Transport de l'AIA	
L'oxydation de l'AIA	
Synthèse et métabolisme des gibbérellines	
La biosynthèse des gibbérellines	
Métabolisme et transport des gibbérellines	
Biosynthèse et métabolisme des cytokinines	
Biosynthèse des cytokinines	
Métabolisme et transport des cytokinines	
Biosynthèse et métabolisme de l'acide abscissique	
Biosynthèse et métabolisme de l'éthylène	
Les mécanismes de l'action hormonale	
Auxine et grandissement cellulaire	
<i>LA THÉORIE DE LA CROISSANCE PAR ACIDIFICATION</i>	
<i>L'AUXINE ET L'EXPRESSION GÉNÉRIQUE</i>	
Le contrôle de l'allongement des tiges	

par les gibberellines	359	Les plantes en apesanteur	407
Le contrôle de la germination des graines par les gibberellines	360	Les nasties	408
Le mécanisme d'action des cytokinines	362	Les nyctinasties	408
Le mécanisme d'action de l'acide abscissique	362	Les séismonasties	411
Chapitre 18		Chapitre 20	
Photomorphogénèse		La Mesure du temps : Photopériodisme et Phénomènes Rythmiques	415
Les réponses à la lumière	367	Le photopériodisme	415
La photomorphogénèse	368	Tabac géant et soja en septembre	416
Le phytochrome	368	Les types de réponses photopériodiques	416
Le phytochrome de plantules qui croissent à l'obscurité	370	La photopériode critique	417
La chimie du phytochrome	372	L'induction photopériodique	419
Effets physiologiques du phytochrome	373	Le rôle primordial de la période obscure	419
Les réponses lfr	374	La perception du signal photopériodique	420
GERMINATION DES GRAINES	374	Le rôle du phytochrome	421
LE DÉVELOPPEMENT DES PLANTULES	374	Besoins en lumière et hormones de floraison	422
POTENTIELS BIOÉLECTRIQUES ET DISTRIBUTION DES IONS	375	Température et photopériodisme	423
Les réponses vlfr	377	L'horloge biologique	424
Les réponses hir	377	Le langage des horloges biologiques	426
Le phytochrome chez les plantes vertes	379	Rythmes circadiens, température et lumière	427
Le phytochrome dans les conditions naturelles	380	La mesure du temps dans le photopériodisme	429
Mécanisme d'action du phytochrome	383	Approches génétiques du photopériodisme et des rythmes	431
Phytochrome et membranes	383	Le photopériodisme dans la nature	432
Phytochrome et activité génique	384		
Les réponses à la lumière bleue	386	Chapitre 21	
Les réponses à l'UV-B	387	Température et Développement des Plantes ...	435
Chapitre 19		La température dans l'environnement de la plante	435
Les Mouvements des Végétaux		Influence de la température sur la croissance et la répartition des plantes	436
L'orientation dans l'espace	391	Côtes et déserts	436
Le phototropisme	392	Les versants montagneux	438
Perception du signal du phototropisme	393	Influence de la température sur le développement	439
LE PHOTORÉCEPTEUR	393	Température et floraison	439
LES COURBES DE RÉPONSES À LA FLUENCE	394	LES CIRCONSTANCES DE LA VERNALISATION	439
La transduction du signal dans le phototropisme	395	LA TEMPÉRATURE EFFICACE	440
Le gravitropisme	398	LA PERCEPTION DU STIMULUS	441
Perception de la pesanteur	398	LA NATURE DU STIMULUS DE VERNALISATION	441
SENSIBILITÉ AU GRAVITROPISME	399	La dormance des bourgeons	442
LA SENSIBILITÉ DES TISSUS	399	Dormance des graines et germination	443
LE MÉCANISME DE PERCEPTION DE LA PESAUTEUR	401	TEMPÉRATURE ET DORMANCE DES GRAINES	445
La transduction du signal gravitropique	402	Réponses aux changements de température	445
La réponse de croissance au gravitropisme	403		
COLÉOPTILES ET RAMEAUX	404		
LES TIGES DES GRAMINÉES	404		
LES RACINES	405		
Le rôle du calcium dans le gravitropisme	406		

Introduction : l'organisation des plantes et leur physiologie

QUATRIÈME PARTIE

Physiologie des stress et biotechnologie

Chapitre 22

La physiologie des plantes soumises aux stress	451
Qu'est ce qu'un stress ?	451
Les réponses des plantes aux stress	452
Le stress hydrique	453
Les membranes et le stress hydrique	453
Photosynthèse et stress hydrique	454
Les réponses des stomates au déficit hydrique	454
L'ajustement osmotique	457
Les effets du déficit hydrique sur la croissance des rameaux et des racines	458
L'ajustement de la surface foliaire	459
Les stress thermiques	459
Stress au froid	459
Le stress provoqué par le gel	460
L'ANALYSE THERMIQUE DE LA CONGÉLATION	461
SURFUSION PRONONCÉE DANS LES TISSUS LIGNEUX	461
L'ACCLIMATATION DES TISSUS LIGNEUX	462
ACCLIMATATION AU FROID DES TISSUS DES PLANTES HERBACÉES	462
Le stress induit par les températures élevées	463
EFFETS DES TEMPÉRATURES ÉLEVÉES SUR LES MEMBRANES ET LE MÉTABOLISME	463
LES PROTÉINES DE CHOC THERMIQUE	464
Le stress salin	464
Insectes et maladies	467
Les réactions d'hypersensibilité	467
Les gènes d'avirulence	467
Résistance systémique acquise	468
Les jasmonates	469
Les polluants de l'environnement	469
Les métaux lourds	470
La pollution de l'air	470

Chapitre 23

Physiologie végétale et biotechnologie	477
Méthodes en biotechnologie végétale	478
La culture de tissus et de cellules	478
Protoplastes et fusions cellulaires	478
L'ADN recombinant	479
Progrès et potentialités des biotechnologies végétales	480
La micropropagation	480
La protection des végétaux	481
RÉSISTANCE AUX HERBICIDES	481
RÉSISTANCE AUX INSECTES ET AUX MALADIES	482
Le métabolisme des plantes	483
Les produits végétaux	484
LES CARBURANTS	484
LES HUILES ALIMENTAIRES	484
LES MATIÈRES PLASTIQUES BIODÉGRADABLES	485
AUTRES PRODUITS	486

Appendice

Mesure du potentiel hydrique et de ses composantes	489
Potentiel hydrique	489
Mesure des variations pondérales	489
Psychromètre à thermocouple	491
Potentiel osmotique	491
Méthodes cryoscopiques	491
Plasmolyse limite	492
Mesures de pression	493

Index	495
--------------	-----

PHYSIOLOGIE VÉGÉTALE

• HOPKINS •

Cet ouvrage très didactique présente **tous les aspects de la vie d'une plante**, de son mode de nutrition cellulaire aux mécanismes qui régissent sa croissance et son développement.

Ses grandes subdivisions décrivent successivement l'organisation des cellules et des organes des plantes, les relations hydriques et la nutrition minérale, les principales réactions du métabolisme en insistant sur l'aspect énergétique, la régulation de la croissance et du développement, la physiologie du stress et la biotechnologie. Le manuel introduit par ailleurs les nouvelles **notions acquises** suite aux développements récents de la **biologie moléculaire**.

Une attention particulière est accordée aux **démarches expérimentales** et au **cheminement intellectuel** qui ont abouti à l'énoncé de concepts tels celui d'hormone végétale ou de transduction des signaux qui induisent les différentes étapes du développement d'une plante.

Au fil des pages, le lecteur est amené à réfléchir et à acquérir les modalités du **raisonnement scientifique**, aidé d'une **iconographie abondante** et souvent extraite d'articles originaux. Chaque chapitre se termine par un résumé et une série de questions qui lui permettent de s'assurer de la bonne compréhension de la matière abordée.

Cette référence incontournable s'adresse aux professeurs et aux étudiants des 1^{er} et 2^e cycles en botanique, agronomie, horticulture et pharmacie.

ISBN 2-7445-0089-5
ISBN13 : 978-2-7445-0089-3



HOPKINS