

ACADÉMIE DES SCIENCES

rst n°10 - octobre 2000

# Le monde végétal

## Du génome à la plante entière

10



rappports sur la science et la technologie

Editions  
TEC  
& DOC

# Table des matières

<b>Préambule</b> – Diversité et particularités du monde végétal . <i>M. Caboche, R. Douce, M. Thellier</i>	XVII
<b>Synthèse</b> .....	XXI
<i>Jacques Joyard</i>	
<b>1. Du génome à la biologie de la plante. Éléments pour une biologie végétale intégrative</b> .....	XXII
<b>1.1. Les plantes et leurs génomes</b> .....	XXII
1.1.1. Génomes du chloroplaste et de la mitochondrie	XXII
1.1.2. Génome nucléaire .....	XXIII
1.1.3. Génomique fonctionnelle .....	XXIV
<b>1.2. La dynamique du métabolisme</b> .....	XXV
1.2.1. Le métabolisme de la plante entière au métabolisme cellulaire .....	XXV
1.2.2. Importance de la compartimentation .....	XXVI
1.2.3. L'usine cellulaire végétale .....	XXVII
<b>1.3. L'équilibre hydrominéral des plantes</b> .....	XXVIII
<b>1.4. Reproduction et développement</b> .....	XXIX
1.4.1. La reproduction .....	XXIX
1.4.2. Développement .....	XXX
<b>2. Les plantes dans leur environnement.</b> .....	XXXII
<b>2.1. Réponses adaptatives des plantes aux conditions de   l'environnement</b> .....	XXXII
2.1.1. De la contrainte modérée au stress environnemental .....	XXXII
2.1.2. Du stimulus à la réponse adaptative .....	XXXIII
<b>2.2. Interactions des plantes avec les facteurs biotiques du   milieu : symbiose et pathologie</b> .....	XXXV
2.2.1. Les symbioses racinaires .....	XXXV
2.2.2. Pathologie végétale .....	XXXVII
<b>2.3. Diversité des modèles biologiques végétaux.</b> .....	XL

3. Le monde végétal : de la recherche aux applications. . . . .	XLII
3.1. Sciences végétales et agriculture . . . . .	XLII
3.1.1. Aspects socio-économiques . . . . .	XLII
3.1.2. Génomique et agriculture. . . . .	XLIV
3.1.3. Nouvelles applications des biotechnologies : la plante usine . . . . .	XLV
3.2. Plantes, environnement et biodiversité . . . . .	XLVII
Conclusion . . . . .	XLIX
Remerciements. . . . .	LI
Références . . . . .	LI
 <b>Recommandations</b> . . . . .	 LIII
<i>Jacques Joyard</i>	
 <b>Overview</b> . . . . .	 LXIII
1. From genome to plant biology. Basis for an integrative plant biology . . . . .	LXIV
1.1. Plants and their genomes . . . . .	LXIV
1.1.1. The chloroplast and mitochondrial genomes . . . . .	LXIV
1.1.2. The nuclear genome . . . . .	LXIV
1.1.3. Functional genomics . . . . .	LXV
1.2. The dynamics of metabolism . . . . .	LXVI
1.2.1. From whole plant metabolism to cell metabolism. . . . .	LXVI
1.2.2. The importance of compartmentation . . . . .	LXVII
1.2.3. The plant cell factory . . . . .	LXVIII
1.3. Water and salt equilibrium of plants. . . . .	LXIX
1.4. Reproduction and development . . . . .	LXX
1.4.1. Reproduction . . . . .	LXX
1.4.2. Development . . . . .	LXXI
2. Plants and their environment . . . . .	LXXIII
2.1. Plant adaptive responses to environmental conditions . . . . .	LXXIII
2.1.1. From moderate constraints to environmental stress . . . . .	LXXIII
2.1.2. From stimulus to adaptive response . . . . .	LXXIV
2.2. Plant interactions with environmental biotic factors: symbiosis and pathology . . . . .	LXXV
2.2.1. Root symbioses . . . . .	LXXVI
2.2.2. Plant pathology . . . . .	LXXVII
2.3. The diversity of plant biological models . . . . .	LXXX
3. The plant world: from research to applications . . . . .	LXXXII
3.1. Plant science and agriculture . . . . .	LXXXII
3.1.1. Social and economic aspects . . . . .	LXXXII

3.1.2. Genomics and agriculture . . . . .	LXXXIII
3.1.3. New applications of biotechnology: the plant factory . . . . .	LXXXIV
3.2. Plants, environment and biodiversity . . . . .	LXXXVI
Conclusion . . . . .	LXXXVII
Acknowledgements . . . . .	LXXXIX
Bibliography . . . . .	XC
<b>Recommendations</b> . . . . .	XCI
<b>Chapitre 1 – Les plantes et leur génome</b> . . . . .	1
<i>Michel Caboche, Michel Delseny, Georges Pelletier</i>	
Introduction . . . . .	3
1. Les génomes des organites cytoplasmiques . . . . .	4
2. Caractéristiques générales du génome nucléaire des plantes . . . . .	5
3. La variabilité génétique . . . . .	8
4. L'organisation du génome d'Arabidopsis . . . . .	9
5. L'analyse fonctionnelle du génome d'Arabidopsis . . . . .	10
6. Les autres génomes et leur analyse fonctionnelle . . . . .	13
7. Le développement de la bio-informatique . . . . .	16
8. Une révolution dans la façon de faire de la recherche . . . . .	16
Références . . . . .	18
<b>Chapitre 2 – Reproduction et développement</b> . . . . .	19
<i>Christian Dumas, Emile Miginiac, Georges Pelletier</i>	
Introduction . . . . .	21
I – La reproduction . . . . .	21
1. Floraison et fleur . . . . .	23
1.1. La mise à fleur . . . . .	23
1.2. La fleur . . . . .	24
1.3. Le déterminisme du sexe . . . . .	26
1.4. La différenciation des organes reproducteurs et des gamètes . . . . .	28
2. Pollinisation et fécondation . . . . .	30
2.1. La pollinisation . . . . .	30
2.2. Les contrôles génétiques régulant la stabilité des espèces et assurant la variabilité intraspécifique . . . . .	32
2.3. La fécondation . . . . .	33
2.4. La stérilité mâle . . . . .	34

3. L'apomixie et les applications des études sur les modes de reproduction des plantes . . . . .	35
4. La multiplication végétative . . . . .	36
II – Le développement végétatif . . . . .	37
1. Mutants et développement . . . . .	37
2. Résultats majeurs . . . . .	38
2.1. L'embryogenèse . . . . .	38
2.2. Les méristèmes et le développement végétatif . . . . .	38
2.3. La sénescence et la fin du développement . . . . .	40
3. Signaux et développement . . . . .	40
3.1. Contrôle du développement par la lumière . . . . .	41
3.1.1. Lumière, floraison, rythmes . . . . .	42
3.1.2. Les photorécepteurs . . . . .	43
3.1.3. Photoperception de la lumière rouge . . . . .	43
3.1.4. Photoperception de la lumière bleue . . . . .	44
3.2. Développement et signaux internes . . . . .	46
3.2.1. Les phytohormones : structure, rôles physiologiques . . . . .	46
3.2.2. Les phytohormones : mécanismes d'action . . . . .	47
Conclusion . . . . .	48
Références . . . . .	50
<b>Chapitre 3 – La dynamique du métabolisme . . . . .</b>	<b>53</b>
<i>Pierre Benveniste, Alain-Michel Boudet, Roland Douce, Jacques Joyard</i>	
Introduction . . . . .	55
1. Métabolisme et facteurs du milieu . . . . .	56
2. Intégration du métabolisme au niveau de la plante entière . . . . .	57
2.1. Transports à longue distance . . . . .	57
2.2. Le saccharose et l'amidon : molécules clés du métabolisme . . . . .	58
2.3. Synthèse des acides aminés . . . . .	63
2.4. Événements biochimiques au niveau de la graine : maturation et germination . . . . .	64
3. Intégration du métabolisme au niveau cellulaire . . . . .	66
3.1. Métabolisme et transports membranaires . . . . .	66
3.2. Métabolisme et compartimentation cellulaire . . . . .	68
3.3. Biogenèse des membranes . . . . .	69
3.4. Polymères glucidiques : importance biologique et applications . . . . .	73
4. L'usine chimique végétale : diversité des substances naturelles . . . . .	74

4.1. Les composés phénoliques . . . . .	75
4.2. Les isoprénoïdes . . . . .	78
4.3. Les alcaloïdes . . . . .	80
4.4. Mécanismes de l'évolution biochimique . . . . .	83
Conclusion : le métabolisme entre recherche et applications . . .	85
Références . . . . .	87
<b>Chapitre 4</b> – Statut hydrominéral des plantes . . . . .	89
<i>Christophe Maurel et Michel Thellier</i>	
1. Bases anatomiques . . . . .	91
2. Bases physicochimiques macroscopiques : flux et forces . . .	93
2.1. Les relations flux/forces : thermodynamique des processus irréversibles . . . . .	93
2.2. Formulation macroscopique des transports d'eau . . . . .	94
2.3. Formulation macroscopique des transports d'ions . . . . .	95
3. Bases moléculaires des transports transmembranaires . . . . .	95
3.1. ATPases, pompes à protons . . . . .	95
3.2. Aquaporines et transport transmembranaire d'eau . . . . .	96
3.3. Transport des cations . . . . .	97
3.4. Transport d'anions . . . . .	98
3.5. Conclusion . . . . .	98
4. Exemples de fonctionnement de systèmes intégrés . . . . .	99
4.1. La cellule de garde des stomates . . . . .	99
4.2. Fonctionnement de la racine : interaction entre transports d'eau et de solutés . . . . .	100
4.3. Ressources hydrominérales et croissance et développement des plantes . . . . .	100
5. Conclusion : états de la recherche et applications . . . . .	101
Références . . . . .	104
<b>Chapitre 5</b> – Réponses adaptatives des végétaux aux contraintes physicochimiques de l'environnement . . . . .	105
<i>Christophe Maurel et Michel Thellier</i>	
1. Réponses adaptatives des plantes aux agressions physicochimiques . . . . .	108
1.1. Stress hydriques et basses températures . . . . .	108
1.2. Mécanismes de détoxification chimique . . . . .	110
1.3. Stimulations mécaniques et températures extrêmes . . .	112
2. De la perception du stimulus à la réponse adaptative . . . . .	113
2.1. Implication des ions $Ca^{2+}$ dans la perception des signaux . . . . .	113

2.2.	Activation de protéines kinases et phosphatases . . . . .	114
2.3.	Modifications précoces d'activités de transcription et de traduction . . . . .	115
2.4.	Conduction de signaux dans les plantes . . . . .	116
2.5.	Stockage de signaux dans la plante . . . . .	116
3.	Conclusions : états et perspectives de la recherche et de ses applications . . . . .	117
	Références . . . . .	118
 <b>Chapitre 6 – Pathologie végétale . . . . .</b>		<b>121</b>
<i>Pierre Abad, Pierre Boistard, Christian Boucher, Gérard Febvay, Monique Garnier, Thierry Langin, Yves Marco, Mme Dominique Roby et Pierre Yot</i>		
1.	Les différents types d'agresseurs et leurs mécanismes d'action . . . . .	123
1.1.	Les virus . . . . .	123
1.2.	Les bactéries phytopathogènes . . . . .	124
1.3.	Les mollicutes (mycoplasmes) phytopathogènes . . . . .	129
1.4.	Les champignons phytopathogènes . . . . .	130
1.5.	Les insectes . . . . .	134
1.6.	Les nématodes . . . . .	135
2.	Réponses des plantes aux agents pathogènes . . . . .	137
2.1.	Les gènes de résistance . . . . .	138
2.2.	La réponse hypersensible, forme de mort cellulaire programmée associée à la résistance . . . . .	140
2.3.	Un mécanisme original de défense contre les virus : la suppression post-transcriptionnelle . . . . .	142
2.4.	Défense des plantes contre les insectes . . . . .	142
	Conclusions . . . . .	144
 <b>Chapitre 7 – Les symbioses racinaires . . . . .</b>		<b>145</b>
<i>Jean Dénarié</i>		
	Introduction . . . . .	147
1.	Symbioses fixatrices d'azote . . . . .	147
1.1.	Les symbioses Rhizobium-légumineuses . . . . .	148
1.1.1.	Les partenaires bactériens . . . . .	148
1.1.2.	Les partenaires végétaux . . . . .	150
1.2.	Les symbioses à actinorhizes . . . . .	151
2.	Symbioses mycorhiziennes . . . . .	152
2.1.	Endomycorhizes à arbuscules . . . . .	152
2.1.1.	Les partenaires fongiques . . . . .	153
2.1.2.	Les partenaires végétaux . . . . .	154

2.2. Ectomycorhizes . . . . .	154
3. Pour une meilleure exploitation des symbioses racinaires . . . . .	155
3.1. Symbioses fixatrices d'azote . . . . .	156
3.2. Mycorhizes . . . . .	157
3.3. Inoculation des microsymbiotes . . . . .	157
<b>Chapitre 8 – Plantes, environnement et biodiversité . . . . .</b>	<b>159</b>
<i>Marianne Lefort, Bernard Saugier</i>	
1. Plantes, écosystèmes et environnement. . . . .	161
1.1. Rôle des plantes dans les cycles biogéochimiques . . . . .	161
1.2. Effets des changements globaux . . . . .	164
1.3. Axes de recherche à développer . . . . .	166
2. Biodiversité végétale : dynamique et fonctions . . . . .	167
2.1. Connaissance approfondie des éléments constitutifs de la biodiversité . . . . .	167
2.1.1. Inventaire, systématique et taxonomie moléculaire . . . . .	167
2.1.2. La diversité génétique intraspécifique : une connaissance très partielle, malgré des outils d'exploration de plus en plus puissants . . . . .	169
2.1.3. La gestion des données et l'organisation des connaissances . . . . .	170
2.2. Dynamique d'évolution dans l'espace et dans le temps . . . . .	170
2.2.1. L'héritage du passé pour la compréhension du présent . . . . .	170
2.2.2. L'inventaire des diversités actuelles, l'analyse de leur structure et de leur dynamique . . . . .	171
2.3. Fonctions et services de la biodiversité . . . . .	173
3. Développement durable et gestion long terme de la biodiversité . . . . .	174
Conclusions . . . . .	177
Remerciements . . . . .	178
Références . . . . .	178
<b>Chapitre 9 – Transgénèse végétale . . . . .</b>	<b>181</b>
<i>Dominique Job</i>	
Introduction . . . . .	183
1. Qu'est-ce qu'une plante transgénique ? . . . . .	183
2. Champs d'application de la transgénèse végétale . . . . .	186
2.1. Objets de l'amélioration des performances des espèces cultivées . . . . .	186
2.2. L'apport de la transgénèse végétale à l'amélioration des espèces cultivées . . . . .	187
2.2.1. Contribution de la transgénèse végétale à la domestication des plantes cultivées . . . . .	187

2.2.2. Augmentation des rendements via la protection des cultures .....	188
2.3. Nouvelles applications. Aspects nutritionnels et industriels. La plante « usine » .....	192
Conclusion. ....	194
<b>Chapitre 10 – Sciences végétales et agricultures</b> .....	195
<i>Hervé Guyomard et Pierre-Benoît Joly</i>	
1. La prospective alimentaire mondiale à l’horizon 2020 .....	197
1.1. Augmenter la production et la productivité est toujours nécessaire .....	198
1.2. La nécessité du succès d’une « révolution doublement verte » .....	199
2. Les politiques agricoles des pays développés : de nouveaux instruments pour de nouveaux objectifs .....	201
2.1. Libéralisation des échanges et nouvelles attentes de la société .....	201
2.2. Les sciences végétales et la promotion d’une agriculture multifonctionnelle .....	203
3. Les enjeux socio-économiques des biotechnologies végétales .....	205
3.1. Des plantes génétiquement modifiées adaptées à la demande et acceptées par la société .....	206
3.2. Plantes génétiquement modifiées et agriculture européenne .....	207
3.3. Plantes génétiquement modifiées et pays en développement. ....	209
Références .....	209
<b>Glossaire</b> .....	211
<b>Groupe de lecture critique</b> .....	213
– Composition du groupe de lecture critique .....	215
<b>Présentation à l’Académie des sciences</b> ...	217
– Intervention de Henri Durantou .....	219