

Biologie végétale

Croissance et développement

4^e édition

Sous la direction de

Jean-François Morot-Gaudry

Directeur de recherche honoraire à l'INRAE, Université Paris-Saclay, membre de l'Académie d'agriculture

Loïc Lepiniec

Directeur de recherche, INRAE, Université Paris-Saclay

Roger Prat

Professeur honoraire à l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC, Paris)

Frédéric Gévaudant

Maître de conférences à l'Université de Bordeaux

Patrick Laufs

Directeur de recherche, INRAE, Versailles

Céline Masclaux-Daubresse

Directrice de recherche, INRAE, Versailles

François Parcy

Directeur de recherche au CNRS de Grenoble

Catherine Perrot-Rechenmann

Directeur de recherche au CNRS, Gif-sur-Yvette

Loïc Rajjou

Professeur à AgroParisTech, Université de Paris-Saclay

Michèle Reisdorf-Cren

Maître de conférences à l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ)

Luc Richard

Maître de conférences Sorbonne-Université, Paris

Arnould Savouré

Professeur à Sorbonne-Université, Paris

DUNOD

Toutes les illustrations ont été réalisées par Roger Prat.

Couverture : SurachaiPung-Adobe Stock.com

© Dunod, Paris, 2009, 2012, 2017, 2021
11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-083153-1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

Remerciements	XI
Introduction	1
Chapitre 1 Les phytohormones	7
1 Comment définir les hormones végétales et leur mode d'action ?	7
1.1 Définition	7
1.2 Le concept d'hormone	8
1.3 Homéostasie	8
1.4 Notions de dose-réponse et de sensibilité tissulaire	9
1.5 Principes généraux du mode d'action des phytohormones	10
2 Présentation générale des phytohormones	11
2.1 Auxines	11
2.2 Gibbérellines	12
2.3 Cytokinines	13
2.4 Brassinostéroïdes	14
2.5 Acide abscissique (ABA)	15
2.6 Éthylène	16
2.7 Jasmonates	16
2.8 Les strigolactones	17
2.9 Les autres molécules : l'acide salicylique et le monoxyde d'azote (NO)	18
2.10 Les hormones peptidiques	18
3 Méthodes d'étude des effets des hormones	19
3.1 Apports exogènes d'hormones	19
3.2 Outils moléculaires : gènes, rapporteurs	19
3.3 Outils génétiques	20
3.4 Combinaisons d'approches expérimentales	20
4 Transport à longue et courte distances: exemple de l'auxine	21
4.1 Historique	21
4.2 Le transport de l'auxine	22
4.3 Les réponses tropiques	25
5 Voies de signalisation	27
5.1 Les récepteurs	28
5.2 Voie de signalisation de l'éthylène	29

6 Conclusion	34
L'essentiel	36
Exercices	37
Solutions	38
Chapitre 2 Perception et transduction des signaux abiotiques	39
1 Comment les plantes se comportent-elles face aux fluctuations de leur environnement ?	40
2 Contraintes de l'environnement et réponses adaptatives	42
3 Perception du stimulus	43
3.1 La perception de contraintes osmotiques : les osmosenseurs	44
3.2 La perception des températures	45
4 Signalisation intercellulaire	45
5 Transduction du signal	46
5.1 Les protéines G	46
5.2 Les protéines kinases/phosphatases	48
5.3 La signalisation lipidique	50
5.4 La signalisation calcique	54
5.5 Les espèces réactives de l'oxygène (Reactive Oxygen Species ou ROS)	57
6 Voies de signalisation et régulation de l'expression de gènes	57
7 Photorécepteurs et développement	58
7.1 Perception de la lumière rouge : les phytochromes	59
7.2 Rôles biologiques des phytochromes	63
7.3 Perception de la lumière bleue : cryptochromes et phototropines	67
8 Le stomate : un exemple de réseau coordonné de voies de signalisation	69
9 Perspectives de recherche et applications agronomiques	72
L'essentiel	73
Exercices	74
Solutions	75

Chapitre 3	Méristèmes et architecture végétale	77
1	Structure et développement du végétal	78
1.1	L'embryon de plante, une structure très simple	78
1.2	La mise en place d'une structure modulaire	79
1.3	Un développement postembryonnaire et très plastique	83
2	Les méristèmes, sièges de l'organogenèse et de l'histogenèse chez les plantes	84
2.1	Diversité et fonctions des méristèmes	84
2.2	Le MAC, une structure multicellulaire complexe	86
2.3	Le MAR contient des cellules souches à l'origine des différents tissus de la racine	88
2.4	Les cellules souches du cambium sont à l'origine du xylème et du phloème secondaires	90
3	Des interactions entre cellules à la base de l'établissement d'une niche de cellules souches	91
3.1	L'interaction entre le centre organisateur et les cellules souches permet de maintenir le MAC	92
3.2	Le centre quiescent est l'organisateur du MAR	96
3.3	Un centre organisateur bien caché dans le cambium	98
3.4	Fonctionnement des niches de cellules souches	98
4	Formation des primordia d'organes par le MAC et phyllotaxie	99
4.1	Maintien des cellules méristématiques dans un état indifférencié	99
4.2	Transition vers un état différencié	101
4.3	Initiation d'un primordium d'organe	101
4.4	Mise en place de la phyllotaxie par le MAC et théorie des champs d'influence	103
5	Activité des méristèmes et architecture végétale	105
5.1	Activité du MAC et port de la plante	105
5.2	Des interactions hormonales et énergétiques régulent la dominance apicale	106
5.3	Contrôle du développement des méristèmes par l'environnement	108
6	Conclusion	109
6.1	Les méristèmes, des structures anciennes qui ont évolué	109
6.2	Des voies de régulation robustes mais souples régulent le fonctionnement des méristèmes	110
6.3	Méristèmes et biotechnologies	110

L'essentiel	112
Exercices	113
Solutions	114
 Chapitre 4 La paroi et la croissance cellulaire	 115
1 Les propriétés multifonctionnelles de la paroi	115
2 Composition et structure de la paroi	118
2.1 Composition et synthèse des constituants de la paroi primaire	118
2.2 Structure de la paroi primaire	123
2.3 La paroi secondaire	124
3 La croissance cellulaire	126
3.1 Les différents modes de croissance	126
3.2 Les moteurs physicochimiques de la croissance diffuse	126
3.3 Les mécanismes de la croissance diffuse	128
4 La paroi : un carrefour de régulations hormonales	134
L'essentiel	136
Exercices	137
Solutions	138
 Chapitre 5 Le développement et la germination des graines	 139
1 La fécondation des plantes, simple ou double ?	140
2 L'embryogenèse	144
2.1 L'embryogenèse précoce et la mise en place d'une polarité apico-basale	144
2.2 L'organogenèse embryonnaire : mise en place de la symétrie bilatérale	145
2.3 Contrôle de l'organisation embryonnaire	146
2.4 Le développement de l'albumen	147
3 La maturation des graines	149
3.1 Accumulation des réserves	149
3.2 Dessiccation de la graine	152
4 La régulation du développement de la graine d' <i>A. thaliana</i>	154
4.1 Caractérisation des régulateurs LAFL	154
4.2 Les mécanismes de régulation transcriptionnelle	155
4.3 Transition entre l'embryogenèse et la maturation : aspects moléculaires et hormonaux	156
4.4 Régulation de l'acquisition de la tolérance à la dessiccation	157

5 La dormance	158
5.1 Définitions et caractéristiques	158
5.2 Rôles des téguments de la graine chez <i>A. thaliana</i>	159
5.3 Mise en place de la dormance	159
6 La germination des graines	161
6.1 L'imbibition	161
6.2 Dormance/germination : effet de l'équilibre hormonal	163
6.3 Mobilisation des réserves de la graine en germination	167
7 Dormance et germination : contrôle environnemental et dialogue hormonal	169
7.1 Dormance et environnement	169
7.2 Dialogue hormonal	171
L'essentiel	173
Exercices	174
Solutions	175

Chapitre 6 La floraison 177

1 Particularités de la floraison chez les plantes	177
2 Description morphologique de la floraison	180
2.1 L'induction florale et évocation florale	180
2.2 L'initiation florale et la floraison	180
3 Contrôle de la floraison par la vernalisation	182
3.1 Description et historique	182
3.2 Mécanisme moléculaire	184
3.3 Contrôle de la floraison par la température ambiante	187
4 Contrôle de la floraison par la photopériode	188
4.1 Description et historique	188
4.2 Mécanisme moléculaire	190
5 Le développement des fleurs	194
5.1 Introduction/évolution	194
5.2 Le développement des organes floraux	196
5.3 Le développement des méristèmes floraux	199
L'essentiel	201
Exercices	202
Solutions	203

Chapitre 7	Le développement du fruit	205
1	Qu'est-ce qu'un fruit ?	205
2	Les différents types de fruits	206
3	La structure du fruit	207
4	Le développement du fruit	208
4.1	Le développement du fruit après fécondation	210
4.2	Le développement des fruits parthénocarpiques	211
4.3	La maturation des fruits charnus	212
4.4	Contrôle génétique de la maturation	215
4.5	La déhiscence des fruits secs	216
5	Conclusion	217
	L'essentiel	219
	Exercices	220
	Solutions	221
Chapitre 8	La plante et son environnement biotique	223
1	Présentation de l'environnement biotique des plantes	223
2	Agents phytopathogènes et ravageurs	225
2.1	Défenses préexistantes de la plante	226
2.2	Activation des défenses de la plante	226
2.3	Le modèle gène pour gène	230
2.4	Les réponses systémiques de défense des plantes	233
2.5	Modes d'attaques spécifiques et réponses adaptées de la plante	233
2.6	Différentes méthodes de lutte – exemple de la pyrale et du maïs	241
3	Symbioses et associations	242
3.1	Symbioses bactériennes	242
3.2	Les symbioses mycorhiziennes	245
3.3	Les lichens	247
4	Conclusion	248
	L'essentiel	249
	Exercices	250
	Solutions	251

Chapitre 9	Sénescence des feuilles	253
1	Les feuilles émergent, se développent et meurent	254
1.1	Les grandes phases du développement de la feuille	254
1.2	Un processus génétiquement contrôlé nécessaire au recyclage nutritionnel	255
1.3	Le recyclage des constituants foliaires	257
1.4	Régulation et contrôle de l'entrée en sénescence	257
1.5	Nature du signal et facteurs de transcription impliqués	258
2	Autophagie, protéolyse et sénescence chez les plantes	259
3	Mort cellulaire programmée, sénescence et apoptose : notions ambiguës et faux amis	260
4	Conclusion	262
	L'essentiel	263
	Glossaire	264
	Bibliographie	268
	Index	269

Remerciements

Nous remercions chaleureusement nos collègues chercheurs et enseignants qui ont accepté de relire avec sérieux et compétence les différents chapitres de cet ouvrage :

- Martine Boccara, professeur, Sorbonne-Université, Paris ;
- Isabelle Bohn-Courseau, professeure en BCPST au lycée Victor Hugo, Besançon ;
- Stéphanie Breuil, professeure en lycée, Lyon ;
- David Busti, enseignant à la préparation à l'agrégation SV-STU à l'ENS-Lyon ;
- Alia Dellagi, maître de conférences, AgroParisTech ;
- Elizabeth Faris Crowell, INRA-Versailles ;
- Didier Grandperrin, professeur en BCPST au lycée Janson de Sailly, Paris ;
- Andrée Hartmann, professeur, Université de Strasbourg ;
- Lise Jouanin, directrice de recherche, CNRS, INRA-Versailles ;
- Marc Jullien, professeur à Agro Paris Tech
- Valérie Lefebvre, chercheur postdoctoral INRA-Versailles.
- Christian Mazars, chargé de recherches CNRS-Toulouse ;
- David Vendehenne, professeur, Université de Dijon ;

Les auteurs remercient Émile Miginiac, professeur émérite à Sorbonne-Université, Paris, qui a relu et corrigé l'ensemble des chapitres de cet ouvrage.

Les auteurs remercient Roger Prat qui a réalisé les illustrations de cet ouvrage.

Les auteurs

Introduction : Jean-François Morot-Gaudry

Chapitre 1 : Catherine Perrot-Rechenmann

Chapitre 2 : Arnould Savouré

Chapitre 3 : Patrick Laufs

Chapitre 4 : Luc Richard

Chapitre 5 : Loïc Rajjou et Loïc Lepiniec

Chapitre 6 : François Parcy

Chapitre 7 : Frédéric Gévaudant

Chapitre 8 : Michèle Reisdorf-Cren

Chapitre 9 : Céline Masclaux-Daubresse

À la découverte de votre livre

1 Ouverture de chapitre

Elle donne :

- une **introduction** aux sujets et aux problématiques abordés dans le chapitre
- un rappel des **objectifs** pédagogiques
- le **plan** du chapitre

Chapitre 1 Les phytohormones

Introduction

Les plantes synthétisent comme les animaux des molécules actives, dites hormones phytohormones, qui gouvernent l'ensemble des processus de leur croissance, de leur différenciation et de leur développement. Leur permettez-elles de s'adapter sans cesse aux différentes conditions de leur environnement. Ces molécules organiques de régulation diffèrent cependant des hormones animales et présentent des propriétés spécifiques au règne végétal. Leurs modes d'action sont multiples et complexes, impliquant des récepteurs spécifiques et des voies de signalisation moléculaires pas toujours complètement identifiées. Ce chapitre présente les aspects physiologiques, biochimiques et moléculaires de ces phytohormones, sans oublier leur mode d'étude.

Objectifs

Comprendre le concept de phytohormones.
Appréhender les principes, hormones et leurs rôles biologiques.
Comprendre les différentes approches de leur étude.
Comprendre leur transport et les aspects moléculaires de leur mode d'action.
Appréhender les voies de signalisation hormonale en prenant l'auxine comme exemple.

Plan

- 1 Comment définir les hormones végétales et leur mode d'action ?
- 2 Présentation générale des phytohormones
- 3 Méthodes d'étude des effets des hormones
- 4 Transport à longue et courte distances : exemple de l'auxine
- 5 Voies de signalisation
- 6 Conclusion

1 Comment définir les hormones végétales et leur mode d'action ?

1.1 Définition

Les hormones végétales, encore appelées **phytohormones**, sont des substances organiques naturelles qui influencent l'ensemble des processus physiologiques de croissance, de différenciation et de développement des plantes et leur confèrent leur capacité d'adaptation aux variations de conditions de l'environnement.

6

2 Le cours

Le cours, concis et structuré, expose le programme. Il donne :

- un rappel des **définitions** clés
- des **schémas** pour maîtriser le cours, certains sont fournis dans une version numérique

1. Comment définir les hormones végétales et leur mode d'action ?

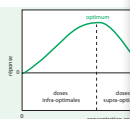


Figure 1.2 - Courbe dose-réponse théorique.

1.5 Principes généraux du mode d'action des phytohormones

DÉFINITION

Le message hormonal est assimilé à un signal qui traduit par les cellules pour aboutir à une réponse à l'échelle de l'organe ou de la plante.

Classiquement une hormone est perçue par un récepteur (ou par le système de signalisation) (Chapitre 2), et se traduit le plus souvent par une action ciblée, gènes codant des protéines qui s'ajoutent à d'autres cibles, et ainsi de suite pour aboutir à une réponse à l'échelle de l'organe ou de la plante (Fig. 1.3).



Figure 1.3 - Schéma simplifié d'une voie de signalisation. L'échelle de temps qui sépare l'impact initial de la perception de l'organe ou de la plante peut être de plusieurs jours. Pendant ce laps de temps un ensemble d'événements vont se produire.

Source : Dictionnaire de biologie, 2010, 1000 pages, 1000 illustrations.

Chapitre 1 - Les phytohormones

Les réponses s'échelonnent sur un pas de temps allant de quelques secondes à plusieurs jours pour les effets physiologiques observables sur la plante entière.

2 Présentation générale des phytohormones

Cette présentation générale est très schématisée et de ce fait incomplète. Elle ne fournit que les propriétés et caractéristiques essentielles des phytohormones.

2.1 Auxines

Nature. L'acide indole-3-acétique (AIA) (Fig. 1.4) est l'auxine naturelle la plus largement répandue mais il existe d'autres auxines naturelles comme l'acide indole-3-butérique (AIB), l'acide phényl-acétique (AP) et l'acide 3-indole acétique.

L'AIA est un acide faible avec un pKa d'environ 4,7. Elle se présente sous sa forme dissociée, anionique d'une courte chaîne latérale carbonée portant

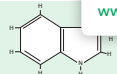


Figure 1.4 - Structure chimique de l'acide indole-3-acétique (AIA).

Voie et sites de synthèse. Deux voies de synthèse à partir d'indole semblent exister, l'une dépendante du tryptophane, l'autre dite « indépendante du tryptophane ». La synthèse a lieu majoritairement dans les **primordia foliaires** et les jeunes feuilles.

Transport. L'AIA se transporte de cellule à cellule par des transporteurs d'efflux et d'efflux ce qui permet un transport polarisé. C'est la seule phytohormone pour laquelle un transport actif a été clairement démontré. Le phénoène contribue aussi au transport de l'auxine des feuilles vers les racines (Fig. 4.2).

Effets. Les effets des auxines sont multiples. Seuls les principaux effets sont indiqués dans le texte, la liste des effets n'est pas conséquente par exhaustivité. Les auxines agissent sur les trois types cellulaires fondamentaux qui sont : les cellules de division, les cellules de croissance et les cellules de différenciation (Chapitres 3 et 4). En particulier, les auxines :

Ressource
numérique sur
www.dunod.com

10

Les rubriques

- Des **encarts** qui développent un point particulier plus en détail
- Des **focus**, des **remarques**, des **méthodes**...

4. Fonctionnement du MAC et développement

4.3 Coordination des fonctions du MAC

a) La plasticité du méristème
Le MAC présente une organisation remarquable étant maintenue au cours du temps, mais en dépit de sa stabilité, le méristème n'est pas statique, continuellement remodelé par des flux méristématiques vers les primordia.

b) Des signaux d'information de position dans le méristème caulinaire
La position des cellules est déterminée par des signaux d'information de position.

DÉFINITION

Des analyses génétiques et biochimiques ont mis en évidence que le méristème caulinaire est un système dynamique.

Cette même expérience fut réalisée par Wardlaw (1988) chez le *Drosera*, qui a une taille nettement plus petite que celle de la position du méristème et était plus active et était plus dynamique.

Les nombreuses espèces disponibles pour l'étude du méristème à adapter son fonctionnement suggèrent l'existence des cellules à travers le méristème.

Pour expliquer cette influence des primordia au méristème, Wardlaw avait l'hypothèse que les signaux d'information des organes : un primordium agit comme un signal d'information.

Cette théorie des signaux d'information est récente donnée sur le rôle de l'auxine dans la division cellulaire, notamment en facilitant la transition de la cellule de la phase G1 à la phase S.

quelques cellules à l'apex du MAC et diffusent aux alentours. Elles jouent un rôle crucial dans le maintien du tissu et d'autres gènes de la famille KIN.

Les **cytokinines** (CK) sont des petites molécules de division cellulaire, notamment en facilitant la transition de la cellule de la phase G1 à la phase S.

quelques cellules à l'apex du MAC et diffusent aux alentours. Elles jouent un rôle crucial dans le maintien du tissu et d'autres gènes de la famille KIN.

Les **cytokinines** (CK) sont des petites molécules de division cellulaire, notamment en facilitant la transition de la cellule de la phase G1 à la phase S.

quelques cellules à l'apex du MAC et diffusent aux alentours. Elles jouent un rôle crucial dans le maintien du tissu et d'autres gènes de la famille KIN.

Les **cytokinines** (CK) sont des petites molécules de division cellulaire, notamment en facilitant la transition de la cellule de la phase G1 à la phase S.

quelques cellules à l'apex du MAC et diffusent aux alentours. Elles jouent un rôle crucial dans le maintien du tissu et d'autres gènes de la famille KIN.

Les **cytokinines** (CK) sont des petites molécules de division cellulaire, notamment en facilitant la transition de la cellule de la phase G1 à la phase S.

quelques cellules à l'apex du MAC et diffusent aux alentours. Elles jouent un rôle crucial dans le maintien du tissu et d'autres gènes de la famille KIN.

1. Comment définir les hormones végétales et leur mode d'action ?

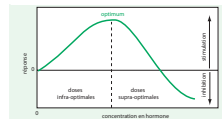


Figure 1.2 - Courbe dose-réponse théorique.

1.5 Principes généraux du mode d'action des phytohormones

DÉFINITION

Le message hormonal est assimilé à un signal qui traduit par les cellules pour aboutir à une réponse à l'échelle de l'organe ou de la plante.

Classiquement une hormone est perçue par un récepteur, ce qui engendré une cascade d'événements (ou par le système de signalisation) ou d'une cascade de transduction (Chapitre 2), et se traduit le plus souvent par une modification de l'expression de différents gènes, gènes codant des protéines qui selon leur fonction vont à leur tour agir sur d'autres cibles, et ainsi de suite pour aboutir à une ou plusieurs réponses cellulaires coordonnées (Fig. 1.3).

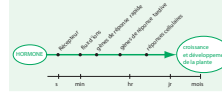


Figure 1.3 - Schéma simplifié d'une voie de signalisation hormonale.

L'échelle de temps qui sépare l'impact initial de la perception de l'organe ou de la plante peut être de plusieurs jours. Pendant ce laps de temps un ensemble d'événements vont se produire en cascade.

Source : Dictionnaire de biologie, 2010, 1000 pages, 1000 illustrations.

3 En fin de chapitre

- L'essentiel : les points clés pour réviser les connaissances essentielles
- Des exercices pour tester ses connaissances
- Les corrigés des exercices

Les points clés du chapitre

- 1 Les organismes vivants sont des systèmes physico-chimiques, dont les interactions avec l'environnement sont gouvernées par des lois physiques, chimiques et biologiques. Ils sont soumis à des contraintes de conservation de la matière, de l'énergie et de l'information.
- 2 Les principes physico-chimiques sont : la thermodynamique, la cinétique chimique, l'équilibre, la persistance, les équilibres, les équilibres de phase.
- 3 Les lois de la thermodynamique sont : la conservation de la matière, la conservation de l'énergie, la conservation de l'entropie.
- 4 Les principes de la cinétique chimique sont : la loi de vitesse, la loi d'action de masse, la loi de conservation de la matière.
- 5 Les principes de l'équilibre chimique sont : la loi de l'équilibre, la loi de l'équilibre de phase, la loi de l'équilibre de réaction.
- 6 Les principes de la persistance sont : la loi de la persistance, la loi de la persistance de l'information, la loi de la persistance de la matière.
- 7 Les principes de la persistance de l'information sont : la loi de la persistance de l'information, la loi de la persistance de la matière, la loi de la persistance de l'énergie.
- 8 Les principes de la persistance de la matière sont : la loi de la persistance de la matière, la loi de la persistance de l'énergie, la loi de la persistance de l'information.
- 9 Les principes de la persistance de l'énergie sont : la loi de la persistance de l'énergie, la loi de la persistance de la matière, la loi de la persistance de l'information.
- 10 Les principes de la persistance de l'information sont : la loi de la persistance de l'information, la loi de la persistance de la matière, la loi de la persistance de l'énergie.

Entraînez-vous

1. Donner la définition d'un organisme vivant.
2. Quel est le principe physique qui régit la persistance de la matière ?
3. Quel est le principe physique qui régit la persistance de l'énergie ?
4. Quel est le principe physique qui régit la persistance de l'information ?
5. Donner l'expression de la conservation de la matière.
6. Quel est le principe physique qui régit la persistance de la matière ?
7. Quel est le principe physique qui régit la persistance de l'énergie ?
8. Quel est le principe physique qui régit la persistance de l'information ?
9. Donner l'expression de la conservation de la matière.
10. Quel est le principe physique qui régit la persistance de la matière ?
11. Quel est le principe physique qui régit la persistance de l'énergie ?
12. Quel est le principe physique qui régit la persistance de l'information ?
13. Donner l'expression de la conservation de la matière.
14. Quel est le principe physique qui régit la persistance de la matière ?
15. Quel est le principe physique qui régit la persistance de l'énergie ?
16. Quel est le principe physique qui régit la persistance de l'information ?
17. Donner l'expression de la conservation de la matière.
18. Quel est le principe physique qui régit la persistance de la matière ?
19. Quel est le principe physique qui régit la persistance de l'énergie ?
20. Quel est le principe physique qui régit la persistance de l'information ?

Solutions

1. Les organismes vivants sont des systèmes physico-chimiques, dont les interactions avec l'environnement sont gouvernées par des lois physiques, chimiques et biologiques. Ils sont soumis à des contraintes de conservation de la matière, de l'énergie et de l'information.
2. Les principes physico-chimiques sont : la thermodynamique, la cinétique chimique, l'équilibre, la persistance, les équilibres, les équilibres de phase.
3. Les lois de la thermodynamique sont : la conservation de la matière, la conservation de l'énergie, la conservation de l'entropie.
4. Les principes de la cinétique chimique sont : la loi de vitesse, la loi d'action de masse, la loi de conservation de la matière.
5. Les principes de l'équilibre chimique sont : la loi de l'équilibre, la loi de l'équilibre de phase, la loi de l'équilibre de réaction.
6. Les principes de la persistance sont : la loi de la persistance, la loi de la persistance de l'information, la loi de la persistance de la matière.
7. Les principes de la persistance de l'information sont : la loi de la persistance de l'information, la loi de la persistance de la matière, la loi de la persistance de l'énergie.
8. Les principes de la persistance de la matière sont : la loi de la persistance de la matière, la loi de la persistance de l'énergie, la loi de la persistance de l'information.
9. Les principes de la persistance de l'énergie sont : la loi de la persistance de l'énergie, la loi de la persistance de la matière, la loi de la persistance de l'information.
10. Les principes de la persistance de l'information sont : la loi de la persistance de l'information, la loi de la persistance de la matière, la loi de la persistance de l'énergie.

1. Un organisme vivant est un système physico-chimique qui est capable de se reproduire, de croître, de se développer, de se différencier, de se spécialiser, de se transformer, de se réguler, de se maintenir, de se persister, de se conserver, de se transmettre, de se transmettre l'information, de se transmettre la matière, de se transmettre l'énergie, de se transmettre l'information.
2. Le principe physique qui régit la persistance de la matière est la loi de la conservation de la matière.
3. Le principe physique qui régit la persistance de l'énergie est la loi de la conservation de l'énergie.
4. Le principe physique qui régit la persistance de l'information est la loi de la conservation de l'information.
5. L'expression de la conservation de la matière est : $\sum m_i = \text{constante}$.
6. Le principe physique qui régit la persistance de la matière est la loi de la conservation de la matière.
7. Le principe physique qui régit la persistance de l'énergie est la loi de la conservation de l'énergie.
8. Le principe physique qui régit la persistance de l'information est la loi de la conservation de l'information.
9. L'expression de la conservation de la matière est : $\sum m_i = \text{constante}$.
10. Le principe physique qui régit la persistance de la matière est la loi de la conservation de la matière.
11. Le principe physique qui régit la persistance de l'énergie est la loi de la conservation de l'énergie.
12. Le principe physique qui régit la persistance de l'information est la loi de la conservation de l'information.
13. L'expression de la conservation de la matière est : $\sum m_i = \text{constante}$.
14. Le principe physique qui régit la persistance de la matière est la loi de la conservation de la matière.
15. Le principe physique qui régit la persistance de l'énergie est la loi de la conservation de l'énergie.
16. Le principe physique qui régit la persistance de l'information est la loi de la conservation de l'information.
17. L'expression de la conservation de la matière est : $\sum m_i = \text{constante}$.
18. Le principe physique qui régit la persistance de la matière est la loi de la conservation de la matière.
19. Le principe physique qui régit la persistance de l'énergie est la loi de la conservation de l'énergie.
20. Le principe physique qui régit la persistance de l'information est la loi de la conservation de l'information.

4 En fin d'ouvrage

Un glossaire

Vous y trouverez les définitions des principales notions développées.

Un index

[illegible]

RESSOURCES NUMÉRIQUES



Retrouvez sur www.dunod.com toutes les ressources numériques complémentaires de ce livre :

- focus documentaires
- Les enseignants bénéficient également de figures de référence pour animer le cours.



