

Avant-propos

Les plantes ont accompagné l'histoire de la biologie en contribuant largement à la connaissance du vivant. La génétique est ainsi née avec Johann Gregor Mendel (1822-1884) au milieu du XIX^e siècle. Les travaux de Mendel sur le pois l'ont conduit à formuler les lois gouvernant la transmission des caractères héréditaires. En étudiant diverses variétés de maïs dans les années 1940-1950, Barbara McClintock¹ (1902-1992) a découvert les éléments mobiles, ou transposons, qui participent à l'évolution des génomes et dont la présence dépasse le cadre des génomes des végétaux. Dans les années 1990-2000, l'étude de l'expression de transgènes chez les plantes a conduit à la découverte de nouveaux mécanismes de régulation génique, relevant non plus de la génétique mais de l'épigénétique (voir l'encadré ci-dessous). Ces mécanismes de régulation génique sont communs aux animaux et aux plantes². De nouvelles techniques dites d'« interférence par l'ARN » (ARNi) en dérivent, permettant de bloquer spécifiquement l'expression de gènes choisis. Les découvertes et applications qui en découlent ont d'importantes répercussions au-delà du règne végétal ; elles ouvrent notamment de nouvelles voies thérapeutiques.

Les végétaux sont un matériel de choix pour étudier l'hérédité et ses mécanismes, tant génétique qu'épigénétique, ainsi que les mécanismes gouvernant la structuration et l'évolution des génomes (voir encadré ci-dessous). Utilisé en génétique végétale depuis les années 1950, *Arabidopsis thaliana* s'impose comme plante modèle ou plante de référence par rapport à d'autres plantes modèles dans les années 1980. Un consensus international s'est établi autour de cette plante, permettant une concentration de moyens et d'efforts de la communauté scientifique végétale. Cet effort a conduit, en 2000, au séquençage complet de son génome nucléaire et à l'inventaire complet de l'information génétique du premier génome d'un organisme eucaryote multicellulaire. La génétique végétale change alors d'échelle et ces travaux de séquençage ouvrent la voie à la génomique structurale (voir encadré ci-dessous), permettant l'analyse de la structure et de l'organisation d'un génome dans sa totalité. La génomique fonctionnelle, qui étudie la fonction des gènes, bénéficie de ces avancées, ainsi que des propriétés naturelles d'une bactérie phytopathogène du sol, *Agrobacterium tumefaciens*, capable de transférer un fragment d'information

1. Sur la vie et l'œuvre de B. McClintock, consulter Fox Keller, 1983.

2. Le prix Nobel 2006 a été décerné à Andrew Fire et Craig Mello qui ont étudié le mécanisme d'interférence par l'ARN (ARNi) chez le nématode *Caenorhabditis elegans*. Cette distinction illustre l'importance de ces mécanismes dans la régulation des gènes. Il est à noter que les premières observations et les premiers modèles ont été décrits chez les plantes.

génétique vers le noyau des cellules végétales et de l'intégrer, dans le génome de ces cellules, de manière stable. Le mécanisme de ce transfert naturel a été finement analysé et exploité. Les plantes ont ainsi été les premiers organismes eucaryotes multicellulaires pour lesquels la transgénèse a été possible. La constitution de collections de mutants étiquetés par transgénèse a ainsi ouvert la voie à la génétique inverse (encadré ci-dessous).

La diversité du monde végétal, sa richesse adaptative et son rôle dans la biosphère font des végétaux un sujet d'étude très important. Organismes autotrophes, ils constituent le premier maillon de la chaîne alimentaire, à l'origine des substances organiques indispensables aux organismes hétérotrophes comme les animaux et l'homme. En effet, grâce à leur capacité photosynthétique et à l'énergie solaire, ils sont capables de synthétiser leur propre matière organique à partir de substances minérales (eau et sels minéraux) et de carbone sous la forme du dioxyde de carbone atmosphérique (Farineau et Morot-Gaudry, 2006). Principaux producteurs d'oxygène, un des sous-produits de la photosynthèse, ils sont également le maillon fondamental de l'écosystème planétaire sans lequel la vie ne pourrait se développer. Par ailleurs, les végétaux synthétisent des « métabolites secondaires » très variées, et sont sources d'une incroyable diversité et richesse chimique. La plupart des plantes étant des organismes fixés, elles subissent, de la part de leur environnement, des contraintes et divers stress (lumière, rayons ultra-violets, sécheresse, froid, pathogènes, herbivores, etc.). Elles font preuve de multiples ressources adaptatives pour y faire face. Enfin, le développement et la différenciation ne sont jamais terminés à l'âge adulte chez les végétaux. Ils possèdent des propriétés de régénération, de multiplication, de cicatrisation et de totipotence remarquables, témoignant de grandes facilités de reprogrammation de leur génome. Ces propriétés accroissent leur capacité d'adaptation.

Le monde végétal est ainsi infiniment plastique ; cette plasticité s'exprime à divers niveaux, adaptatif, évolutif, morphologique, physiologique, génétique et témoigne d'une très grande richesse qui reste à explorer. L'incroyable diversité des végétaux, leurs compétences chimiques, leurs potentialités adaptatives remarquables, ainsi que leur plasticité ontogénique sont inscrites dans leurs génomes et épigénomes. Leur étude devrait permettre de mieux appréhender le potentiel qu'ils représentent pour l'homme et la biosphère. Ainsi le séquençage de plusieurs génomes de plantes de référence (Planches 1 à 3) a été entrepris. Pour certaines, il a été achevé, ouvrant de nouvelles perspectives pour comprendre l'organisation et l'évolution des génomes.

Le présent ouvrage se propose d'offrir au lecteur un panorama de la génétique moléculaire végétale afin de mieux suivre et appréhender les évolutions de ce domaine. Il se veut accessible à un public ayant des bases de biologie générale. Dans une première partie, il présente une description des différents génomes végétaux et aborde les aspects les plus récents de la régulation de l'expression des gènes. Il s'appuie sur les connaissances acquises à partir de génomes de référence, en particulier celui d'*A. thaliana*. Dans une seconde partie, les outils qui ont conduit à ces connaissances sont présentés. Comme les premiers généticiens des plantes, nous avons trouvé pertinent d'utiliser les déterminants génétiques de la couleur des fleurs (les gènes de la voie de biosynthèse des anthocyanes et quelques-

uns des gènes régulateurs) comme « fil rouge » pour illustrer cet ouvrage (Planche 4). Nous avons choisi de faire référence à des articles dont les travaux nous ont inspirés pour construire ce livre. Dans certains cas, des expériences pertinentes ou des éclaircissements méthodologiques sont présentés sous forme d'encadrés.

Certaines notions sont rappelées en fin d'ouvrage sous forme d'annexes. Le lecteur trouvera des notions de biologie végétale présentant le cycle de reproduction des angiospermes et quelques caractéristiques des végétaux (hormones, totipotence, méristème) dans l'annexe 1, ainsi que des notions de base en génétique dans l'annexe 2. Il nous est également apparu nécessaire de présenter sous forme synthétique les différentes étapes de la régulation des gènes eucaryotes (Annexe 3). Par ailleurs, certains ouvrages pourront être consultés en complément (Alberts *et al.*, 1992 ; Griffiths *et al.*, 2006 ; Lewin, 2007 ; Allis *et al.*, 2007 ; Battey *et al.*, 1993 ; Prat *et al.*, 2006 ; Morot-Gaudry et Briat, 2004).

Génétique : science de l'hérédité. La génétique étudie les caractères héréditaires des individus, leur transmission au fil des générations et leurs variations (mutations). L'étude de la transmission héréditaire des caractères a permis l'établissement des lois de Mendel.

Génétique moléculaire : elle a pour objet d'étudier la structure et la fonction des gènes au niveau moléculaire. Elle utilise l'information génétique portée par l'ADN et étudie comment cette information est exprimée.

Génétique inverse : elle étudie le phénotype des mutants affectés dans une séquence nucléotidique d'un gène déterminé, tandis que la génétique moléculaire part d'un mutant pour identifier le gène, puis la séquence nucléotidique affectée par la mutation responsable du phénotype.

Régulation génique : c'est le contrôle cellulaire de la quantité et de la temporalité du produit d'un gène. Ce produit peut être l'ARN messager ou la protéine. Toutes les étapes de l'expression d'un gène peuvent être modulées depuis le niveau transcriptionnel jusqu'au niveau post-traductionnel. La régulation est la base de la différenciation et de l'adaptabilité d'un organisme.

Épigénétique : ce terme a été proposé au début des années 1940 par le généticien Conrad Waddington pour désigner une nouvelle science étudiant les mécanismes par lesquels le génotype engendre le phénotype. Dans sa définition moderne, le terme épigénétique caractérise toute modification potentiellement réversible qui n'affecte pas la séquence de l'ADN et qui soit cependant transmissible lors de la mitose et/ou de la méiose. Ces modifications se situent ainsi au-dessus (épi) du niveau de l'ADN (l'information génétique) et s'inscrivent sur la chromatine pouvant alors participer à la régulation de l'expression des gènes.

Génomique : elle répertorie l'ensemble des gènes d'un organisme vivant et en étudie les fonctions. La génomique structurale *via* la cartographie et le séquençage décrit l'organisation du génome et fait l'inventaire des gènes. La génomique fonctionnelle utilise l'ensemble des données du génome pour étudier l'expression du génome dans son ensemble et a pour objet de comprendre les interactions entre les gènes au cours de différents processus biologiques.

Épigénomique : cette discipline étudie à l'échelle d'un chromosome ou d'un génome la distribution des différentes marques de la chromatine (méthylation de l'ADN, modifications des histones, etc.) en relation avec l'expression des gènes.