



LES VÉGÉTAUX, UN NOUVEAU PÉTROLE ?

JEAN-FRANÇOIS MOROT-GAUDRY

éditions
Quæ

LES VÉGÉTAUX, UN NOUVEAU PÉTROLE ?

JEAN-FRANÇOIS MOROT-GAUDRY



Éditions Quæ

© éditions Quæ, 2016

ISSN : 2267-3032
ISBN : 978-2-7592-2488-3

Éditions Quæ
RD 10
78026 Versailles Cedex

www.quae.com

Le code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique. Toute reproduction, partielle ou totale, du présent ouvrage est interdite sans autorisation des éditeurs ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris.

Sommaire

La bioéconomie, une économie de substitution.....	5
Remerciements	9
Introduction.....	11
Chapitre 1 • Qu'est-ce que la biomasse végétale et d'où vient-elle ?	15
Qu'est-ce que la biomasse ?	15
La photosynthèse, source de matière végétale ?.....	17
Description des produits de la photosynthèse	18
Chapitre 2 • La biomasse peut-elle être utilisée en l'état ?	27
Quels sont les produits végétaux directement valorisables ?.....	27
Les acides gras, huiles et oléochimie	38
Les protéines	42
Les produits du métabolisme secondaire.....	44
Chapitre 3 • La biomasse peut-elle être source de molécules de base organiques ?	49
Les molécules de base de la chimie organique, les synthons	49
La chimie blanche, source de synthons	50
Quels sont les principaux synthons issus des végétaux ?.....	53
Les plastiques biosourcés	66
Les matériaux d'origine végétale.....	70
Chapitre 4 • Biomasse verte vs pétrole, quels sont les enjeux ?	75
Les bioraffineries	75
La biomasse, source d'agrocultures ?	81
Chapitre 5 • Quelles sont les incidences de la chimie biosourcée sur l'environnement ?	85
Le cycle de vie des composés biosourcés	85
Le problème des déchets organiques et régénérations des sols ?	88
Quelles sont les incidences de la chimie biosourcée sur le climat et le paysage ?	89
Chapitre 6 • Quels sont les aspects économiques et sociétaux de la chimie biosourcée ?	91
Quels sont les différents acteurs des filières de produits biosourcés ?	91
Quelles en sont les contraintes économiques ?	92
Y a-t-il compétition des prix entre produits biosourcés / produits issus de la pétrochimie ?.....	93



Les produits biosourcés vont-ils créer de nouveaux marchés ?	
Quelles sont les politiques incitatives des États ?	95
Les produits biosourcés vont-ils compromettre les équilibres satisfaction alimentaire / produits industriels ?.....	96
Les produits biosourcés vont-ils créer de nouveaux emplois ?.....	99
Chapitre 7 • Quelles sont les voies de recherche à venir ?	103
Produire en quantité pérenne des bioproduits aux caractéristiques recherchées par l'industrie	103
Assurer une régularité dans les rendements tant en quantité qu'en qualité ..	104
Adapter l'outil industriel de transformation existant.....	104
Revoir et améliorer les techniques de modification des bioproduits.....	105
Rechercher des bioproduits à finalité industrielle pour des usages de masse ou de niche à haute valeur ajoutée	105
Recourir peu ou prou à l'ingénierie génétique	106
Chapitre 8 • Quelles plantes cultiver ?	113
Chapitre 9 • Que faire pour valoriser les produits du végétal ?	139
Glossaire	145
Bibliographie	151

La bioéconomie, une économie de substitution

L'Académie d'agriculture de France s'intéresse depuis plusieurs années à la valorisation de la matière biologique végétale notamment pour des applications autres qu'alimentaires. En effet, suite à l'« oubli » qu'a amené l'arrivée des produits carbonés fossiles, charbon, gaz et pétrole, dans les pays développés, nous redécouvrons depuis peu que beaucoup de produits chimiques carbonés (lubrifiants, solvants, tensioactifs, etc.), matières énergétiques et matériaux (matières plastiques, par exemple) peuvent aussi être fabriqués à partir de la matière biologique, la biomasse, à des coûts énergétiques relativement bas tout en rejetant peu de gaz à effet de serre et de produits toxiques dans l'environnement. Cette prise de conscience nous a amenés à revoir notre façon de penser et notre manière de vivre et à nous orienter vers une nouvelle économie dite bioéconomie, qui préconise de réduire ou de remplacer le plus possible l'utilisation de ces hydrocarbures fossiles par des ressources végétales renouvelables produites par la photosynthèse.

Par cette nouvelle stratégie soucieuse d'éviter le gaspillage énergétique et de réduire notre dépendance vis-à-vis des produits carbonés fossiles, souvent situés dans des zones politiquement instables et quoiqu'il en soit épuisables à terme, la société souhaite favoriser la recherche et l'innovation pour réaliser une transition de notre économie basée sur le carbone et les énergies fossiles vers une économie durable et plus respectueuse de l'environnement. Cette transition, d'après les experts, aurait de surcroît un coût minime, tout en générant de multiples bénéfices collatéraux comme le stockage biologique du carbone atmosphérique dans les sols, les végétaux et les bioproduits dont le bois. Cette nouvelle économie devrait de plus entraîner la création d'emplois nouveaux pour la production et la transformation des bioressources au sein même des territoires, favorisant ainsi leur ré-industrialisation. Le développement de la bioéconomie mondiale, surtout en Europe, devrait rester de fait limité et



équilibré, ce qui devrait éviter des déplacements d'usages et de territoires de production agricole sur la planète, tout en préservant la biodiversité « naturelle ». Les débats et les polémiques relatifs à la bioéconomie et à sa supposée menace sur la production alimentaire au profit de la production industrielle (chimie biosourcée, par exemple) sont, en Europe au moins, de portée plus théorique (voire idéologique) que pratique.

La bioéconomie engendre des avantages certains, « des externalités positives », quand on évoque pour l'agriculture, l'agro-industrie ou la filière forêt-bois-fibres, les emplois qui en découlent, le carbone évité dans l'atmosphère, les devises économisées, etc. Malheureusement, ces importants bénéfices externes ne se traduisent pas par des valorisations et des rémunérations sonnantes et trébuchantes immédiatement visibles ; ce sont des services gratuits d'intérêt collectif. À l'inverse, la filière des hydrocarbures fossiles n'assume pas la plupart des coûts externes qu'elle engendre pour la collectivité, comme la pollution, les rejets de gaz carbonique et les dépenses de devises, sans oublier notre dépendance en produits énergétiques, qui sont considérés comme autant d'externalités négatives. La prise en compte de telles externalités par les politiques publiques aurait sans nul doute un effet de rééquilibrage au profit de la compétitivité et du développement des filières biosourcées, dans le contexte climatique prégnant que nous connaissons.

Cet ouvrage rappelle tout d'abord les problèmes posés par l'utilisation massive, voire exclusive dans certains cas, des produits fossiles pour la chimie et la fabrication des matériaux à base de carbone. Il décrit ensuite les principaux composés rencontrés dans les végétaux et leurs transformations en biomolécules et bioproduits, à la base de la chimie organique. Il évoque les avantages et les problèmes posés par cette approche durable de la chimie, aux racines finalement ancestrales. Une liste des principales plantes d'intérêt est donnée pour montrer combien de nombreux végétaux sont encore détenteurs de molécules originales pour la chimie, parfumerie et cosmétologie incluses. Une discussion conclusive sur les retombées économiques, sociétales et environnementales de cette approche « chimie biosourcée » montre que cette économie « verte » n'est pas une utopie mais

une réalité qui prend forme dans un monde conscient des limites de l'utilisation excessive des produits fossiles. Dans un esprit de synthèse, sans être exhaustifs, nous avons essayé d'être les plus objectifs possible dans les débats qu'engendre cette nouvelle approche de la chimie issue essentiellement de produits biologiques végétaux. Ces réflexions essaient de croiser, sans *a priori* ni exclusive, les connaissances les plus récentes avec les attentes technologiques nécessaires à une chimie et une agriculture durables.

Remerciements

Je remercie toutes les personnes du groupe de travail Chimie biosourcée qui m'ont aidé à élaborer ce document et encouragé à le publier. J'adresse tout particulièrement mes remerciements à Florent Allais, Bernard Ambolet, Jean-Louis Bernard, Stéphanie Baumberger, Thierry Chardot, Jean-Pierre Décor, Xavier Déglise, Michel Girard, Daniel-Éric Marchand, et Jean-Claude Pernollet, Jean Tayeb, Pierre-Henri Texier qui ont relu, critiqué et amendé ce texte.

Liste des membres du groupe de travail Chimie biosourcée, Académie d'agriculture de France

Allais Florent, professeur et directeur de la chaire Agrobiotechnologies industrielles, ABI, AgroParisTech, Reims

Ambolet Bernard, ancien directeur des affaires scientifiques chez Bayer, membre correspondant de l'Académie d'agriculture, section Agrofournitures

Baumberger Stéphanie, directrice de recherche Inra-Versailles, maître de conférences AgroParisTech

Bernard Jean-Louis, consultant protection des cultures et environnement Syngenta-Agro, membre de l'Académie d'agriculture, section Agrofournitures

Chardot Thierry, directeur de recherche Inra-Versailles, AgroParisTech

Déglise Xavier, ancien directeur du Laboratoire d'étude et de recherche sur le matériau bois (Lermab), Université de Lorraine, membre correspondant de l'Académie d'agriculture, section Forêts et filière bois

Girard Michel, ancien directeur du développement agricole de Total, membre de l'Académie d'agriculture, section Agrofournitures



Marchand Daniel-Éric, ancien directeur de participations chez Unigrains, membre de l'Académie d'agriculture, section Agro-fournitures

Morot-Gaudry Jean-François, directeur de recherche honoraire Inra, membre de l'Académie d'agriculture, section Sciences de la vie

Pernollet Jean-Claude, directeur de recherche honoraire Inra, membre de l'Académie d'agriculture, section Sciences de la vie

Texier Pierre-Henri, administrateur de Farm et de l'association Ensemble contre la faim et la malnutrition (ECFM), membre de l'Académie d'agriculture, section Agro-fournitures

Introduction

Dès la haute Antiquité, les hommes ont utilisé le bois comme source d'énergie et comme élément de construction et de fabrication d'outils et de charrettes. Les fibres de plantes étaient employées pour confectionner leurs vêtements ainsi que les matériaux nécessaires à leurs équipements usuels. Les hommes se servaient également des extraits de plantes pour fabriquer des colorants, des cosmétiques et des médicaments. Jusqu'au XIX^e siècle, la culture ou l'exploitation de plantes tinctoriales (garance, indigotier, châtaignier, noix de galle...) et la production de plantes à fibres (lin, chanvre...) occupaient encore près d'un million d'hectares en France (Bichat et Mathis, 2013).

La découverte du charbon et du pétrole a été une source d'énergie nouvelle facilement exploitable et longtemps bon marché, qui a permis un développement énergétique sans précédent et a représenté jusqu'à nos jours une source de matière première organique et de matériaux qui a remplacé tout ou partie des produits agricoles et forestiers précédemment utilisés. Ainsi, la pétrochimie, depuis le début du XX^e siècle, a fortement bouleversé la production et l'utilisation des produits agricoles non alimentaires. De simple industrie d'extraction de matières végétales (éventuellement animales) à l'origine, la chimie organique s'est donc convertie presque exclusivement à la transformation de produits fossiles pour ses usages.

Mais si l'utilisation massive des produits carbonés fossiles, charbon et pétrole, a permis un développement énergétique et chimique (pétrochimie notamment) sans précédent, elle a provoqué des bouleversements importants sur l'environnement dont l'humanité n'a pris conscience que récemment. Cette consommation à grande échelle de produits carbonés fossiles importés a contribué à l'émission de gaz à effet de serre, CO₂ et méthane, responsables d'un réchauffement du climat dont les effets sur notre environnement sont encore mal connus. En outre, face à la croissance de l'ensemble des besoins, les ressources mondiales fossiles tels le charbon, le gaz naturel et surtout le



pétrole, continuent à s'épuiser (40 à 50 ans de réserve pour le pétrole, 60 à 70 ans pour le gaz, 200 à 300 ans pour le charbon), même si le développement récent des gaz et pétroles de roche-mère (produits issus des schistes) amène temporairement sur le marché de la chimie organique des molécules économiquement très compétitives, comme le méthane et l'éthane qui conduisent aux principaux composés de la chimie du carbone (Roy, 2013).

Or la France possède peu de ressources d'énergies fossiles telles que le charbon, le gaz naturel et le pétrole mais développe une grande activité agricole (SAU, surface agricole utile, de 28 millions d'hectares) et possède un territoire forestier important (16,4 millions d'hectares). Le développement des bioproduits pourrait donc constituer un substitut partiel au pétrole, à la fois comme source d'énergie (agrocarburants et combustibles) et comme matière première pour l'industrie chimique (produits chimiques biosourcés). La valorisation des produits de l'agriculture donne en effet accès à une énergie renouvelable et à des biomolécules de la chimie végétale qui sont d'une part concurrentes de la pétrochimie et d'autre part originales, présentant des propriétés innovantes, c'est-à-dire manifestant des propriétés spécifiques permettant de satisfaire de nouvelles fonctionnalités.

L'amidonnerie, la lipochimie existent depuis des siècles et continuent à se développer en satisfaisant les besoins pour lesquels la pétrochimie n'a pu jusqu'à présent mettre sur le marché des produits concurrents, tant en qualité qu'en prix. De plus, des progrès spectaculaires ont été réalisés ces dernières décennies pour améliorer et diversifier la transformation des produits végétaux en carburants, produits chimiques et biomatériaux. Il est actuellement possible d'élaborer à partir de la biomasse végétale des agrocarburants, des solvants, des tensioactifs, des lubrifiants, etc. Le saccharose et l'amidon, les principaux glucides végétaux produits en masse, sont source d'éthanol. Les fibres végétales représentent encore la moitié des fibres utilisées dans l'habillement. Les huiles végétales et leurs dérivés possèdent des propriétés solvantes, lubrifiantes, émoullientes ou tensioactives. Tous ces composés issus du végétal se trouvent donc en bonne position pour concurrencer, voire remplacer tout au moins partiellement, les produits dérivés du pétrole. De même, la production de

plastiques biodégradables à partir de sucre de betteraves, d'amidon de blé, de maïs ou de pommes de terre et demain à partir de paille transformée, peut résoudre simultanément le problème de l'élimination des déchets végétaux et celui de l'utilisation exclusive de produits pétroliers. Enfin, les industries de la pharmacie, des cosmétiques, des fibres textiles se tournent également de plus en plus vers des produits issus des végétaux qui présentent généralement moins de facteurs allergisants, d'autant plus préoccupants que les populations mondiales actuelles manifestent à cet égard des sensibilités accrues. La production végétale ne reste plus exclusivement alimentaire et redevient, comme un siècle auparavant, un fournisseur de produits destinés à l'alimentation et à l'activité humaine. La biomasse végétale fournit également des composés nouveaux, originaux, relativement complexes, dont la synthèse serait coûteuse, voire impossible par voie chimique.

Par ailleurs, les composés issus de la biomasse, dits biosourcés, moins énergivores en général pour leur élaboration, tout au moins pour ceux utilisés sans transformation importante comme les fibres, l'amidon et les huiles, allient souvent, mais non nécessairement, biodégradabilité et moindre impact sur l'environnement. Ces considérations sont à prendre sérieusement en compte dans un contexte où les politiques publiques se renforcent pour lutter contre le changement climatique et poussent à réduire les émissions de gaz à effet de serre, tout en incitant les industriels à utiliser et valoriser des ressources végétales renouvelables et biodégradables comme les déchets agricoles. Rappelons que la Communauté européenne a mis en place en 2007 le règlement *Reach* (*Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals*), destiné à combler le déficit de connaissances des risques environnementaux et sanitaires qui peuvent résulter de la production et de l'utilisation des substances chimiques issues de la pétrochimie. Entré en vigueur le 1^{er} juin 2007, il stipule que toutes les substances chimiques, produites ou importées à plus d'une tonne par an et par fabricant ou importateur, y compris celles qui circulent déjà, devront faire l'objet d'une analyse de risques et être testées par leurs fabricants ou importateurs dans les dix années à venir. Désormais, c'est aux producteurs de substances et non plus aux autorités publiques de prouver que



les risques liés aux substances qu'ils produisent sont valablement maîtrisés : c'est le renversement de la charge de la preuve.

En conséquence, pour réduire son impact sur l'environnement, sa dépendance aux énergies fossiles et développer de nouveaux produits et marchés, la chimie doit s'inscrire impérativement dans une démarche de développement durable. Substituer au pétrole une matière organique d'origine biologique, végétale en particulier, permet de considérer une nouvelle chimie dite « chimie issue du végétal » ou « chimie du carbone biologique ou organique » ou « chimie biosourcée ». Cette forme de chimie, ancienne à l'origine, est d'autant prise en considération ces dernières années que la montée des préoccupations écotoxicologiques se renforce au fur et à mesure que les connaissances en toxicologie progressent. La chimie biosourcée devient un des axes essentiels de la chimie verte ou chimie écologique, qui prévoit la mise en œuvre de principes pour réduire et éliminer l'usage ou la génération de substances néfastes pour l'environnement, par de nouveaux procédés chimiques et des voies de synthèses respectueuses de l'environnement.

Si cette nouvelle bio-industrie n'en est qu'à ses débuts, continuant à faire appel à des composés chimiques pour le traitement de certaines matières naturelles et restant souvent économiquement peu compétitive en raison de ses coûts élevés, elle commence à se déployer, que ce soit dans les domaines chimiques, pharmaceutiques ou cosmétiques. Elle vise donc dans ce contexte à utiliser de préférence les plantes, la biomasse en général (algues, microorganismes, déchets végétaux et animaux), pour la fabrication de très nombreux produits chimiques, réduisant ainsi la consommation abusive des réserves fossiles en carbone.



CHAPITRE 1

QU'EST-CE QUE LA BIOMASSE VÉGÉTALE ET D'OÙ VIENT-ELLE ?

QU'EST-CE QUE LA BIOMASSE ?

La biomasse au sens large est définie par la loi de programme n° 2005-781 du 13 juillet 2005 comme « la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers ». Elle est la source de matière organique carbonée produite par les organismes vivants et suite à leur décomposition. Cette biomasse est formée essentiellement de carbone, d'oxygène, d'hydrogène et, à un moindre degré, d'azote provenant de divers types de ressources. Ses principaux gisements sont les produits d'origine agricole, subdivisés entre, d'une part, les cultures annuelles traditionnelles (céréales, oléagineux, protéagineux, etc.) et pérennes (forêts, taillis, cultures sylvicoles spécifiques comme les taillis à courte rotation de peupliers ou d'eucalyptus, par exemple), et d'autre part, les cultures dédiées à la production de matière organique non alimentaire (*miscanthus*, *switchgrass*, etc.), sans oublier les résidus de cultures (pailles, feuilles, tiges, etc.) et d'élevage. On y inclut aussi les produits d'origine aquatique (algues, résidus de pêches et de pisciculture), les coproduits et effluents des industries de transformation des matières biologiques (sciure de bois, résidus de papeteries, d'élevages industriels et d'industries agroalimentaires), et enfin les boues issues des stations d'épuration, les ordures ménagères, les déchets verts des parcs et jardins (Bichat et Mathis, 2013).

La biomasse est valorisable ou valorisée sous forme d'aliments, de fertilisants organiques, de matériaux dont le bois, d'énergie (agroc carburants, gaz, chaleur, électricité) et de molécules dédiées à la chimie. Toutes ces filières sont renouvelables. La biomasse est non seulement qualifiée par ses ressources mais

également par sa faculté à produire et stocker du carbone renouvelable photosynthétique (carbone vert), utilisable par de très nombreuses filières dans le cadre de ce qu'on appelle la bioéconomie. La bioéconomie est une théorie économique, développée par Nicholas Georgescu-Roegen au début des années 1970, qui met en valeur la base biologique ou « naturelle » de tous les processus économiques et donc des problèmes humains associés à la déplétion de nos ressources naturelles (Tayeb *et al.*, 2015a).

QU'EN EST-IL DES ALGUES ?

Les algues pourraient constituer une catégorie de biomasse à part entière, mais leurs usages préférentiels se limitent aux produits alimentaires, pharmaceutiques et cosmétiques en raison des lipides ou des molécules très fonctionnalisées qu'elles contiennent. Une exception peut être faite cependant concernant les microalgues, qui en culture peuvent avoir des rendements importants, en lipides notamment, sans confiscation de terres agricoles. Les rendements des Diatomées et des Chlorophycées sont très fortement supérieurs (40 t/ha/an) à ceux des plantes terrestres car les microalgues sont des organismes unicellulaires qui vivent en suspension dans un milieu aqueux, très favorable à un meilleur accès aux nutriments et à la lumière. De plus, ces microalgues, lorsqu'elles sont soumises à un stress, augmentent leur production en lipides (source d'agrocarburants, par exemple) qui peut dépasser alors 50 % de la biomasse totale produite. Leur culture reste encore économiquement prohibitive aujourd'hui hormis pour des usages à forte valeur ajoutée mais elles suscitent de grands espoirs à l'avenir. De nombreuses recherches sont en cours dans ce domaine, tant au plan fondamental qu'au plan technologique.

On estime entre 120 et 150 milliards de tonnes la quantité de carbone fixée annuellement à la surface de la planète par photosynthèse (40 % sur le continent et 60 % dans les océans), ce qui représente environ 8 à 10 fois la consommation d'énergie par l'activité humaine. Seuls 10 % seraient accessibles,

c'est-à-dire physiquement et économiquement exploitables, et 3,5 % sont d'ores et déjà utilisés. C'est la troisième source d'énergie renouvelable. À l'échelle globale, on exprime les quantités de biomasse dans une unité énergétique la tep, énergie produite par la combustion d'une tonne de pétrole moyen (42 GJ), ce qui représente environ 11 600 kWh. Cette unité équivalente pétrole correspond à peu près à une tonne de carbone et à deux ou trois tonnes de matière sèche végétale. Les bioressources utilisées par l'homme représenteraient 5 000 millions de tep : 36 % sont originaires de la forêt, 40 % de l'agriculture et 24 % des pâturages. De cet ensemble, 15 % sont finalement utilisés pour l'alimentation humaine, 20 % pour les matériaux ou d'autres produits industriels, 33 % pour l'énergie, y compris celle de traction animale, et 32 % sont perdus, dont une moitié est restituée à la terre sous forme de fumier (Bichat et Mathis, 2013 ; de Cherisey, 2014).

En France, la production moyenne de biomasse est estimée entre 1,3 et 1,7 tep/ha/an. Sur des sols de bonne qualité, bien pourvus en eau, une culture de betterave peut produire de 5 à 6 tep/ha/an. Dans de bonnes conditions, la forêt française assure une productivité de 2,5 tep/ha/an. Avec une production moyenne de 1,4 tep/ha/an et une surface utile de 40 millions d'hectares, la production nationale totale de biomasse serait de 56 Mtep/an. C'est 1,4 fois notre consommation de produits pétroliers pour les transports. Cette production est toutefois bien supérieure à ce qui peut être récolté actuellement (Bichat et Mathis, 2013).

Dans notre ouvrage, nous nous focaliserons essentiellement sur les productions végétales, agricoles et forestières, incluant les coproduits et les déchets, c'est-à-dire les agroressources qui fournissent les composés de base nécessaires à l'énergie, la chimie et les matériaux d'origine organique.

LA PHOTOSYNTÈSE, SOURCE DE MATIÈRE VÉGÉTALE ?

La photosynthèse est le processus biologique qui permet aux végétaux de générer, à partir du carbone issu du CO₂ atmosphérique



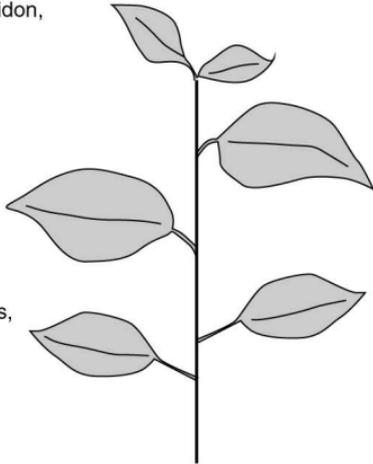
et en utilisant l'énergie du soleil, le renouvellement de la biomasse végétale disponible sur Terre, induisant ainsi une circulation des flux biogéochimiques du carbone. Les premiers produits de la photosynthèse sont les glucides, saccharose notamment, les acides aminés et les acides gras. À partir de ces éléments de base, les plantes sont capables d'élaborer des milliers de molécules simples et complexes : amidon, cellulose, lignines, protéines, lipides, acides nucléiques, terpènes, composés phénoliques, etc. (fig. 1). Rappelons à cet effet que les plantes et les bactéries sont seules capables de synthétiser abondamment les acides aminés et les vitamines indispensables au développement des organismes vivants supérieurs, mammifères par exemple. Les plantes renferment une très grande diversité biochimique et sont considérées comme les meilleures usines chimiques de la planète (Farineau et Morot-Gaudry, 2011).

Métabolites primaires

Glucides, amidon, cellulose

Acides gras, lipides

Acides aminés, protéines



Métabolites secondaires

Isoprénoïdes (terpènes, caroténoïdes, stérols)

Phénylpropanoïdes (acides phénoliques, flavonoïdes, lignines)

Hétérosides et alcaloïdes

Figure 1. Principales molécules produites par les plantes.

DESCRIPTION DES PRODUITS DE LA PHOTOSYNTHÈSE

La photosynthèse produit des glucides simples et polymérisés (amidon, cellulose, hémicelluloses), des composés phéno-