

Chimie du végétal, fer de lance de la chimie durable

Christophe Rupp-Dahlem est président de l'Association chimie du végétal (ACV) depuis 2008, membre du conseil d'administration du pôle de compétitivité Industrie et Agro-Ressources (IAR¹) et directeur des Programmes d'Innovation Chimie du Végétal. Il travaille au sein de la société Roquette Frères² sur ce vaste domaine en plein développement, qui est présenté dans ce chapitre.

Le domaine de la chimie du végétal nous invite en premier lieu à un voyage à travers les siècles, car on en trouve des formes depuis le lointain passé. Ce qui nous permettra, dans une seconde partie, de faire ressortir les spécificités des demandes actuelles, qui se placent dans l'optique du développement durable imposé par la raréfaction des ressources.

1. www.iar-pole.com

2. www.roquette.fr

1 Les ressources, à travers les siècles³

1.1. Retour à l'Antiquité : nos ancêtres utilisaient des ingrédients naturels riches

Les fresques rupestres de notre ancêtre homo sapiens étaient faites de pigments d'origines végétales ; les

3. Voir aussi *La Chimie et l'habitat*, Chapitre de D. Gronier, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2011.



Figure 1

De la main préhistorique de la grotte Chauvet à la tombe de Néfertari dans l'Égypte Antique, jusqu'au château de Versailles, les pigments étaient entièrement d'origine végétale, animale ou minérale.

Tableau 1

Ingrédients de peintures utilisés dans l'Antiquité. Les œuvres d'art étaient faites à partir de matières premières naturelles !

Pigments	<ul style="list-style-type: none"> – Noir de charbon (bois ou os), oxydes de manganèse (Préhistoire) – Rouges oxydes de fer, pourpre des coquillages, cinabre sulfure de mercure (Rome) – Bleus de lapis-lazulis, silicate double de calcium et de cuivre (Égypte), de la plante Guède/Pastel (Europe) – Verts de malachite, carbonate de cuivre (Égypte)
Charges	Argile, talc ou feldspaths
Liants	À base de graisse, de cire d'abeille, d'huile de lin, de noix, etc.
Solvants	Essentiellement eau et essence de térébenthine

Égyptiens, puis les Romains après eux, ont continué dans cette voie, mettant même des indications de formulations par écrit. Le Moyen Âge marque un développement important dans cette voie, avec à côté de la continuation des usages artistiques, des utilisations pour les bâtiments de l'époque, véritables défis de construction comme le sont les cathédrales gothiques.

L'apogée de l'utilisation du végétal aux siècles antérieurs est sans conteste le château de Versailles. Cette réalisation reste aujourd'hui extrêmement impressionnante,

surtout si l'on réalise qu'elle n'a évidemment eu aucun recours au pétrole, sans lequel on sait faire peu de chose à l'heure actuelle (**Figure 1**).

Le **Tableau 1** indique les principaux pigments utilisés dans le passé. Il s'agissait souvent d'associations entre un minéral (noir de charbon, os, etc.) et un extrait de végétal (huile de ricin, de noix, etc.) qui assure la partie liante, la solubilisation, la « filmogénèse⁴ ».

4. Un liant de peinture est dit filmogène lorsqu'il permet de donner des films par simple évaporation des solvants dans lesquels il est dissout.

1.2. Début du XX^e siècle : la première ère industrielle de la chimie du végétal : une bioraffinerie à base de bois en 1900

Au début du XX^e siècle, c'est déjà l'ère industrielle, portant avec elle la chimie du végétal : en Allemagne, est construite en 1902 et exploitée jusqu'en 1950 une bioraffinerie à base de bois (de bouleau) qui produit de l'acide acétique, du méthanol et de l'acétone. Il s'agissait de l'entreprise Degussa (devenue Evonik). Il est intéressant de signaler qu'à la même époque (1906), des procédés enzymatiques étaient développés à l'échelle industrielle ; les enzymes, ex-

traites de pancréas de porc, étaient fournies par l'entreprise Röhm.

Puis les premiers biocarburants et biomatériaux sont apparus dans les années 1920-1930, grâce aux travaux pionniers de Carver et Ford (*Encart : « Des pionniers de la chimie du végétal : Carver et Ford »*).

1.3. L'ère des ressources fossiles

Cette chimie du végétal du début du XX^e siècle a été supplantée par l'utilisation des ressources fossiles : la carbochimie, majoritaire jusque vers les années 1970, puis la

DES PIONNIERS DE LA CHIMIE DU VÉGÉTAL : CARVER ET FORD

L'exceptionnel parcours d'un passionné du « végétal »

Carver, prénommé Georges Washington (*Figure 2*), était fils d'esclaves du Missouri. Il réussit à suivre un cursus normal dans un lycée du Kansas, avant de devenir le premier étudiant noir de l'*Iowa State Agricultural College*. Dirigeant le département d'agriculture de l'Institut de Tuskegee à partir de 1896, il a convaincu des fermiers du sud d'abandonner la culture du coton pour celle de l'arachide, et ses succès en ont fait l'un des scientifiques américains les plus respectés de l'époque. Il a marqué de nombreuses inventions le domaine qu'on appellerait aujourd'hui celui des biotechnologies alimentaires.

Un « prix Carver » récompense chaque année les auteurs de développements importants pour la chimie du végétal. Carver lui-même a été honoré en 2010 au congrès BAYO à Toronto.

Une collaboration féconde avec Henry Ford

Comme Carver, Henry Ford était passionné par le potentiel de nouvelles cultures, comme l'arachide ou le soja pour la production de matière plastique, de peinture ou de carburant. Il était convaincu que le monde aurait un jour besoin d'un substitut au pétrole, et soutenait à cette fin la production d'éthanol. En 1942, il exposera une voiture à carrosserie légère faite à partir de soja.

Ford et Carver entretenaient une correspondance depuis 1934 et concurent une grande admiration l'un pour l'autre, qui les conduisit à collaborer. Carver installa en 1942 un laboratoire pour étudier la fabrication de substitut de caoutchouc à partir de patates douces, de fleurs ou de mauvaises herbes.

Carver mourut en 1943 et Ford en 1947 mais la collaboration entre l'entreprise Ford et l'institut de Tuskegee continuait encore en l'an 2000.

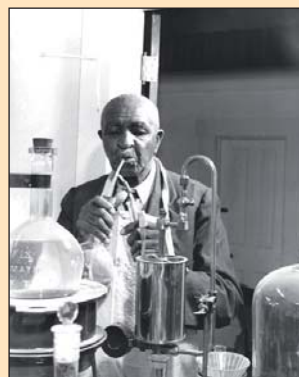
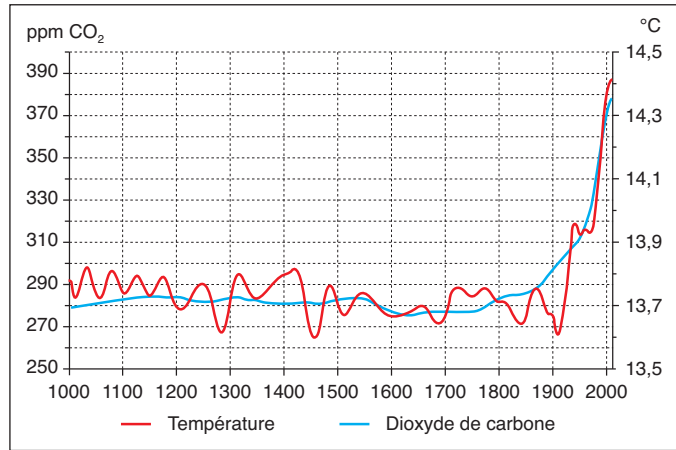


Figure 2

George Washington Carver (1864-1943), dans son laboratoire.

Figure 3

Lien entre CO_2 et température des océans.



pétrochimie. La disponibilité de matières premières à bas coût et la banalisation des procédés détrônaient le végétal. Les objets de la vie quotidienne sont aujourd'hui issus de la pétrochimie, mais ses avantages mêmes, permettant une grande diffusion, ont conduit à des excès bien identifiés, dont particulièrement le réchauffement climatique. La **Figure 3** montre de façon très frappante la corrélation entre la concentration du gaz carbonique dans l'atmosphère et la température des océans. Ceci est rattaché à l'activité humaine qui aura bientôt entraîné le doublement de sa concentration d'origine (280 ppm).

1.4. À l'apogée de l'ère des ressources fossiles

À côté du réchauffement climatique, un deuxième phénomène menace nos activités humaines, c'est l'épuisement des ressources fossiles. La notion de « pic » ou « peak » (de « peak oil » dans le cas du pétrole) est mise en avant : il s'agit du moment où l'accroissement des réserves

consécutif à l'exploration ne compense plus leur diminution due à l'exploitation, aujourd'hui de 80 à 85 millions de barils par jour – le début d'un déclin (**Figure 4**).

Ainsi aujourd'hui, pour six barils consommés, on a un seul baril découvert. Tous hydrocarbures confondus, le pic devrait survenir aux alentours des années 2030-2040, chiffre étant évidemment sensible aux hypothèses faites sur l'exploitation des sables et schistes bitumineux (voir à ce sujet le **Chapitre de J. Amouroux**). La limitation de la ressource pétrolière est ainsi devenue proche et indique un horizon rapproché pour son remplacement, au moins partiel, par le végétal, la biomasse.

Cette évolution de la ressource pétrolière est l'une parmi beaucoup des conséquences de l'explosion démographique de la planète, qui va atteindre neuf à dix milliards d'habitants au milieu du siècle (**Tableau 2**). Ainsi, l'efficacité de la pêche se heurte déjà à la diminution de la ressource halieutique, et la consommation en eau douce va augmenter apportant

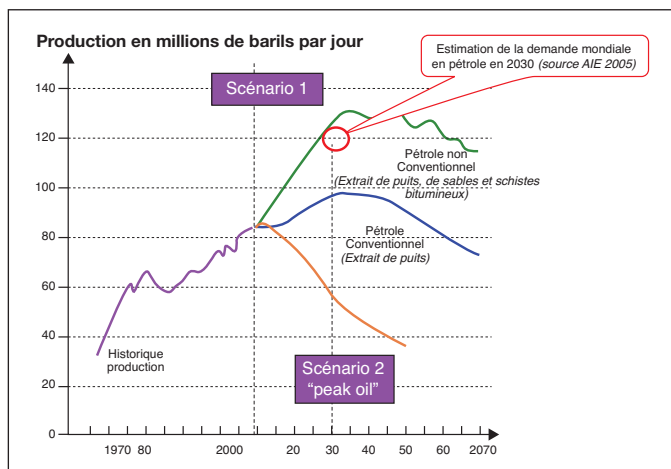


Figure 4

Les perspectives mondiales de production de pétrole, mettant en évidence la raréfaction des ressources fossiles.

Tableau 2

Croissance démographique et conséquences sur l'environnement. Le CO₂ n'est pas le seul défi à relever !

	1950	1972	1997	2050
Population (en milliard de personnes)	2,5	3,8	5,8	10,7
Pêche et stock de poisson (en million de tonnes par an)	19	58	91	35
Consommation en eau (en kilomètre cube par an)	1300	2600	4200	7500
Émission de CO ₂ (en million de tonnes par an)	1,6	4,9	7	14
Mégacités (villes de plus de 8 millions d'habitants)	2	9	25	200

une nouvelle cause d'émission de gaz à effet de serre. Sur un autre plan, on assiste à l'explosion du nombre de mégacités (plus de 8 millions d'habitants) : de 25 en 1997, il devrait passer à 200 en 2050.

Le résumé laisse peu d'ambiguïté : les besoins de l'humanité vont en croissant (par exemple + 70 % en besoin alimentaire en 40 ans), les ressources vont en diminuant, donc leur prix va augmenter, l'accroissement de la température due à l'émission du CO₂ va devenir menaçante. Les historiens pourront dire que ce que nous vivons, c'est la fin de l'âge du pétrole, que la **Figure 5** place bien en effet en perspective historique. Tout

change, il faut inventer autre chose. Ce que nous allons voir ici sera le recours – et le retour – au végétal...

Figure 5

Évolution du cours du baril de pétrole de 1970 à nos jours (en US \$).

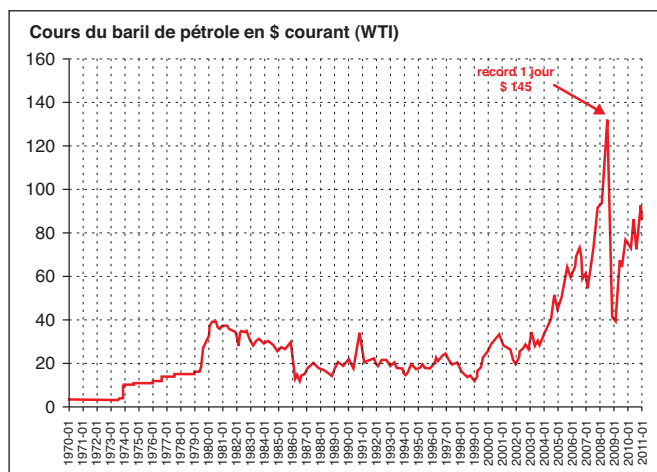


Figure 6

Vue géographique du monde en fonction des échanges commerciaux.

A) Vue géographique ; B) vue en fonction de l'activité des ports ; C) vue en fonction de l'exportation de pétrole. En France, nous importons notre pétrole ; D) vue en fonction de l'exportation de produits chimiques (la France est le 2^e chimiste en Europe derrière l'Allemagne) ; E) vue en fonction de l'exportation de céréales. La France est le 2^e exportateur de produits agricoles au monde.

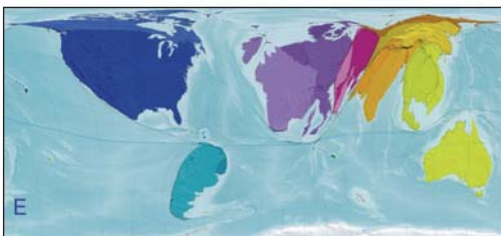
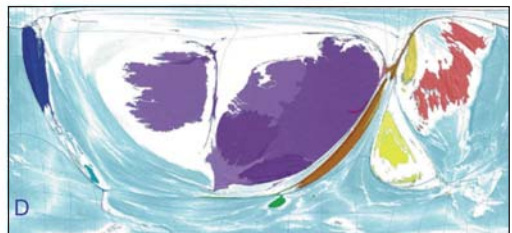
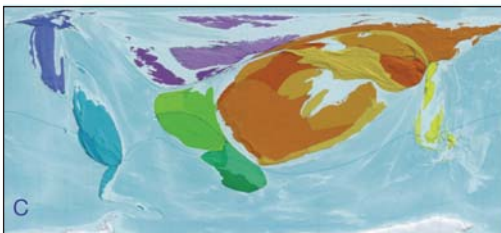
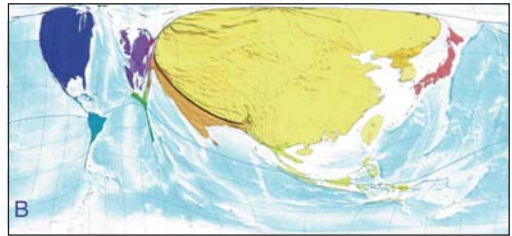
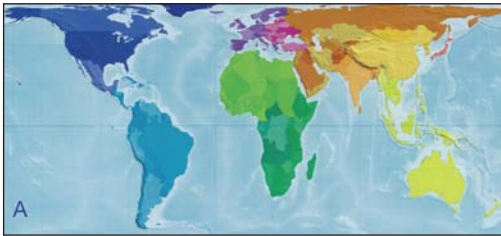
2 Une opportunité à saisir pour la chimie française

La **Figure 6A** présente la carte géographique bien connue des grandes régions mondiales. Les **Figures 6B, 6C, 6D** et **6E** en sont des déformées adaptées chacune à un échange commercial particulier : le nombre des conteneurs en transit, les exportations de pétrole, de produits chimiques, de céréales. On voit ainsi la France disparaître de la carte des exportations pétrolières, l'Afrique de celle des exportations de céréales, etc., et la Chine dominer celle des transits de containers.

Pour nous situer à l'échelle mondiale, on peut extraire de ces cartes les remarques suivantes. Si l'activité manufacturière (les conteneurs) est

monopolisée par la Chine, et si l'exportation de pétrole ne concerne pas la France, les deux autres cartes nous font en revanche apparaître des atouts : une position mondiale forte en matière de chimie et une position très forte en matière d'exportation de céréales, et plus généralement de matières agricoles. La conclusion est limpide :

Avec une industrie chimique puissante et une abondance de matières premières agricoles, la France réunit les conditions pour réussir une transition vers l'utilisation du végétal en remplacement de la ressource pétrolière en voie de restriction.



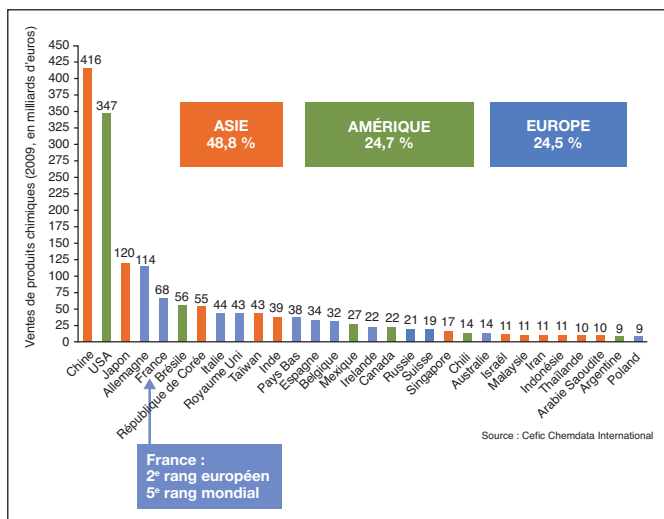
Pour être plus quantitatifs, on peut comparer l'importance de l'industrie chimique française à ses concurrentes (*Figure 7*). La France, qui occupe la 5^e place, est toujours très honorable, malgré la récente stupéfiante croissance de la Chine. S'il est vrai que globalement la France s'est davantage désindustrialisée que ses voisins, elle a conservé une industrie chimique très vigoureuse qui occupe aujourd'hui près de 200 000 personnes⁵. Cependant, il faut noter que la dynamique des pays industriels traditionnels (Amérique du Nord, Europe, Japon) est très largement dépassée par celle des pays émergents – Amérique latine et surtout Asie. Ce terme d'émergent apparaît même dépassé si l'on considère que la Chine est devenue le premier producteur mondial de produits chimiques en 2005.

3 Un levier pour la croissance verte du futur

3.1. Cap vers la chimie du végétal

Aujourd'hui, la chimie utilise environ 10 % du pétrole extrait, le reste allant à l'énergie ; mais ces 10 % représentent environ 95 % de ses besoins. Par ailleurs, les chimistes utilisent la matière première végétale pour 5 à

5. La valeur ajoutée de l'industrie par rapport à la valeur ajoutée globale de la France est de 12 %, à comparer à 30 % en Allemagne, 20 % en Italie et 14 % au Royaume-Uni. En revanche, l'industrie chimique reste bien placée.



8 % de leur production. L'objectif est de monter cette proportion à 20 ou 30 % en vingt ans, c'est-à-dire à l'horizon 2030.

Ceci amène à présenter le concept de **bioraffinerie** (voir aussi le *Chapitre de P. Monsan*). De même que dans une raffinerie, le pétrole brut est transformé en quelques grands intermédiaires dont chacun sert de départ à une filière qui conduit à un ensemble de produits pouvant entrer ultérieurement dans des processus de formulations, de même la bioraffinerie réalise ces étapes à partir de la matière végétale. Le champ pétrolier est remplacé par un champ agricole – aujourd'hui maïs, colza, blé, puis demain le bois de la forêt. On couple ensuite des procédés biotechnologiques et des procédés chimiques pour arriver jusqu'aux formulations finales. Dans les concepts actuels (*Figure 8*), un véritable métabolisme industriel est mis en place, c'est-

Figure 7

Chiffres-clés de l'industrie chimique.

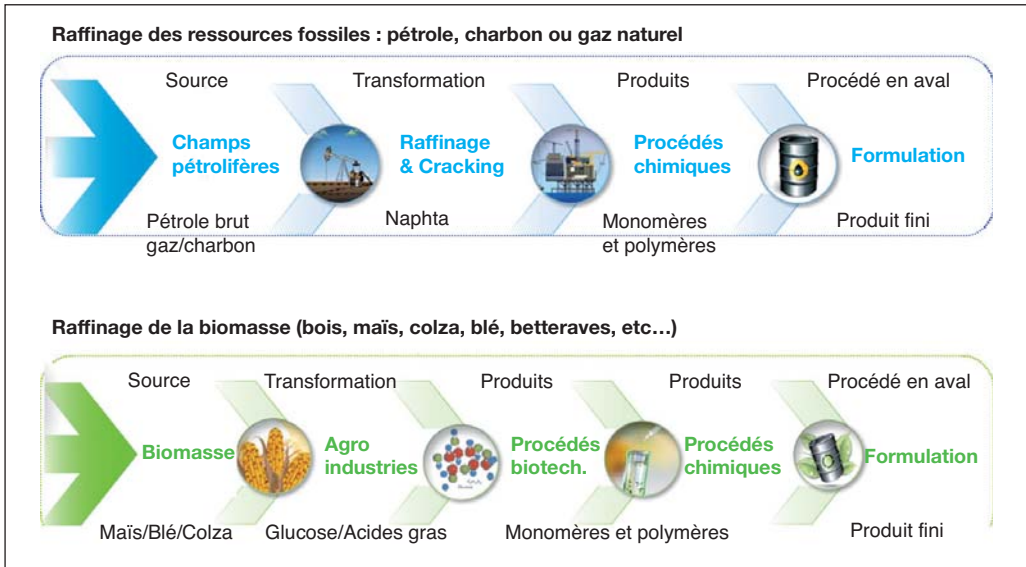


Figure 8

Parallèle entre le concept des bioraffineries et celui des raffineries de pétrole.

à-dire une gestion des flux ne produisant aucun déchet mais uniquement des produits intéressants, que ce soit pour l'alimentation humaine ou animale, pour la chimie, ou encore pour la production d'énergie.

La chimie du végétal concerne potentiellement une très grande diversité de plantes [Encart : « Qu'est-ce que la chimie du végétal ? »]. Mais le choix doit tenir compte en premier lieu de la priorité à laisser aux matières agricoles

alimentaires, ainsi qu'il est périodiquement soulevé au cours des débats sur l'utilisation de biocarburants.

Pour apprécier la situation, il y a lieu de considérer en quelques ordres de grandeur la quantité totale disponible et la quantité disponible pour la chimie (Figure 9). La production mondiale totale de biomasse est estimée à 120 milliards de tonnes par an, dont seuls 5 % sont exploités, principalement pour les besoins alimentaires (62 %) et pour le bois (33 %).

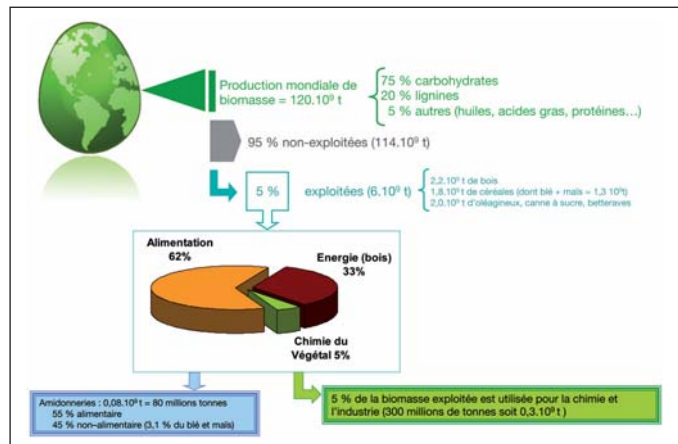


Figure 9

La biomasse, en chiffre : une ressource renouvelable à exploiter.

QU'EST-CE QUE LA CHIMIE DU VÉGÉTAL ?

La chimie du végétal utilise les biotechnologies blanches (la fermentation, la biocatalyse, voir le *Chapitre de P. Monsan*), dans lesquelles elle utilise une large palette de matières premières renouvelables (*Figure 10*) :

- les plantes à fibres ;
- les céréales ;
- les oléoprotéagineux ;
- le bois et dérivés ;
- les algues et micro-algues ;
- les plantes à colorants ;
- les co-produits issus de l'agriculture et agro-industrie ;
- etc.



Figure 10

La biomasse, une large palette de matières premières renouvelables.

À ne pas confondre avec la chimie verte...

La chimie du végétal n'est pas ce qu'on appelle la « chimie verte », mais en constitue un pilier important. La chimie dite « chimie verte » s'attache à économiser les ressources en matières premières et en énergie, et à minimiser les rejets dans l'environnement (voir le *Chapitre de M. Fontecave*).

Ce ne sont donc finalement qu'environ 300 millions de tonnes qui sont concernées aujourd'hui par la chimie du végétal. Doubler cette quantité en une décennie n'apparaît donc pas comme un objectif

déraisonnable : en Europe, la chimie du végétal n'utilise que 1 à 2 % des surfaces arables ; par ailleurs, des accroissements sont possibles pour les rendements agricoles si cela devait s'avérer nécessaire.

La chimie du végétal est déjà une branche industrielle, puisque la chimie utilise les matières premières végétales pour 5 à 8 % de sa production, comme rappelé plus haut. Ceci correspond à un chiffre d'affaires d'environ 28 milliards d'euros et environ 190 000 emplois pour toute l'Europe. Pour la France, on estime ce dernier chiffre à 40 000 emplois, qu'il est intéressant de rapprocher du chiffre de 18 000 emplois correspondant à l'activité sur les biocarburants : on parle pourtant davantage de l'industrie des biocarburants que de la chimie du végétal ! Au Grenelle de l'Environnement (2007), des accords ont été pris pour l'accroissement de l'activité « Chimie du Végétal » de 15 % à l'horizon 2017, un engagement qui est tout à fait dans la ligne des objectifs adoptés à l'échelle européenne.

3.2. De nouvelles organisations

Le développement de l'utilisation de la chimie du végétal dans l'industrie chimique impose des collaborations et des organisations nouvelles. Des compétences traditionnellement séparées doivent être sollicitées ensemble, et ceci donne une situation industrielle très éclatée (**Tableau 3**) :

- les bioraffineurs achètent la biomasse et la transforment en « produits de première transformation » : amidons, glucose, huiles, glycérine, etc. ;
- les technologues sont la plupart du temps des petites industries, voire des start-up, qui apportent une expertise technologique soit en biotechnologie, soit en chimie, soit en procédé ;
- les chimistes catégorie « bio-sourcés » produisent aussi bien des commodités que des spécialités à partir d'inter-

Tableau 3

Vue d'ensemble de l'industrie de la chimie du végétal.

Bioraffineurs	Technologues	Chimistes		
		Biosourcé et chimie	Biotech. et chimie	Pétrochimie
Experts dans la transformation de ressources végétales	Experts en Biotech et fournisseurs de solutions	Développement des produits bio-sourcés et polymères	Double-compétence biotech. et chimie	Principalement concentrés sur la chimie base fossile
Cargill, ADM, Tate&Lyle, Roquette, Sofiprotéol, Tereos Syral, Siclaé	Novozymes, Metabolic Explorer, Biométhodes, Deinove, Global Bioenergies, Metabolix, Purac, Genomatica	Commodités : Braskem, Dow, Solvay ; Spécialités : Arkema, Seppic	DSM, Dupont, Evonik, Mitsubishi Chemical, BASF	Exxon Mobil, Eastman, Total

médiaires d'origine végétale aussi bien que pétrolière. On peut citer la filière brésilienne, qui partant du sucre de canne (le moins cher du monde) produit de l'éthanol puis de l'éthylène par déshydratation, puis du polyéthylène ou du PVC par polymérisation ;

– les chimistes catégorie « biotechnologies » sont des acteurs essentiels puisqu'ils apportent dans ce domaine leur expérience industrielle basée sur leurs connaissances en biologie ; ils connaissent par exemple l'évolution des levures et de leurs efficacités de conversions. Les quelques entreprises industrielles qui possèdent à la fois les compétences de chimie et celles des biotechnologies occupent évidemment une position privilégiée dans le domaine ;

– les derniers acteurs cités sont les chimistes traditionnels de la pétrochimie. Ils s'intéressent au domaine principalement par le moyen de participations dans des projets conduits par d'autres.

4 Roquette, un acteur industriel majeur dans la chimie du végétal

4.1. Présentation du groupe

Le groupe Roquette est présenté en chiffres dans l'*Encart* : « *Le groupe chimique Roquette, leader dans la chimie du végétal* ».

Présentons un panorama de lignes d'activités actuelles de cette société. Mieux que des exposés analytiques, il illustre les possibilités et les champs d'excellence de la chimie du végétal.

4.2. Les activités de Roquette

4.2.1. L'isosorbitol (isosorbide) et dérivés

Le maïs ou le blé sont constitués à 70 % d'amidon, polymère naturel qui peut être coupé par des enzymes (amylases) pour produire du glucose (au sujet de l'amidon, voir le *Chapitre de J. Amouroux*). Hydrogéné, celui-ci donne du sorbitol, qui est produit au niveau de 1 000 tonnes par jour en continu et qui permet la synthèse de l'isosorbitol.

L'isosorbitol est un produit connu de longue date, dans les années 1980 déjà pour ses propriétés pharmaceutiques, et vendu au niveau de quelques dizaines de tonnes par an. Le programme « Bio-Hub » a été créé en 2005 pour chercher de nouvelles applications que ses capacités de polymérisation rendaient prometteuses. C'est en effet un diol, donc réactif avec des acides, mono- ou di- acides, et c'est de plus un cycle très rigide favorable à des propriétés mécaniques exigeantes. Aujourd'hui, l'Europe à elle seule regroupe déjà des unités de production de plusieurs milliers de tonnes par an.

Les principales utilisations à l'origine de ce succès proviennent de la substitution dans le polyéthylène téréphtalate d'un monomère (par exemple de l'éthylène glycol) par un isosorbitol, afin d'augmenter la température de transition vitreuse⁶ du polymère

6. La température vitreuse d'une matière est l'intervalle de température à travers lequel la matière passe d'un état caoutchouteux à un état vitreux (rigide).

LE GROUPE CHIMIQUE ROQUETTE, LEADER DANS LA CHIMIE DU VÉGÉTAL

- La **Figure 11** montre l'usine de Lestrem, la principale du groupe, située dans le Nord de la France (il en existe dix-huit autres dans le monde). C'est la plus grande bioraffinerie en Europe : 3 000 personnes produisent plus de 500 produits orientés nutrition-santé et chimie du végétal.
- Le chiffre d'affaires est de 3 milliards d'euros en 2011.
- Environ 6 millions de tonnes les matières premières par an (7 000 tonnes de céréales arrivent tous les jours à Lestrem de la Loire pour le maïs et de partout pour le blé). À côté des céréales, la pomme de terre, le pois.

Activités

- 65 % pour l'alimentation humaine ;
- 35 % pour la chimie du végétal (pour le papier, les intermédiaires les cosmétiques).

Effort de recherche : 300 personnes et plus de 3 % du chiffre d'affaires. Les programmes sont ouverts aux sociétés extérieures.



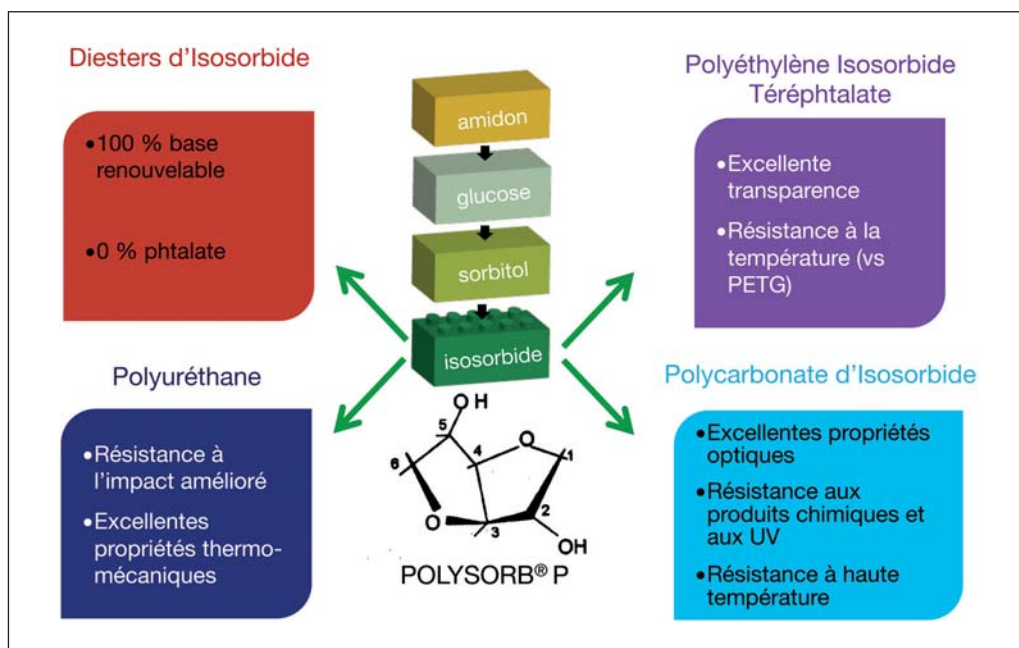
Figure 11

Bioraffinerie de Lestrem (Roquette).

jusqu'à près de 100 °C. Cette propriété nouvelle ouvre le champ à de nouvelles applications (**Figure 12**).

Un effet analogue est obtenu sur les polycarbonates. La so-

ciété Mitsubishi a développé, à partir du polycarbonate substitué issu de nos recherches, le nouveau polymère dénommé Durabio, qui a la particularité, appréciable depuis les soup-



cons adressés à cette molécule, de ne pas contenir de bisphénol A. La résistance aux produits chimiques, les propriétés de transparence et la résistance mécanique sont autant de facteurs – les avantages du plexiglas, du PMMA⁷ mais sans bisphénol A – qui expliquent le succès de ce polymère bio-sourcé. Le matériau verre, par exemple dans les voitures, devrait pouvoir être remplacé par ce polymère.

Par réaction avec un acide gras bio-sourcé, l'isosorbide, on obtient un diester (le produit commercialisé sous le nom de Polysorb® ID 37) capable d'être substitué très simplement au bisphénol A, plastifiant utilisé

7. PMMA = polyméthacrylate de méthyle. Voir l'ouvrage *La Chimie et l'art, le génie au service de l'homme*, chapitre de M.A. Thébaud, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, R.A. Jacquesy, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2010.

pour les polyphthalates (*Figure 13*). Ceci permet d'éviter la présence de ce plastifiant dénoncé dans les produits correspondants : tubes, revêtements de sols, etc. Malgré un certain surcoût, cela intéresse des applications particulières :

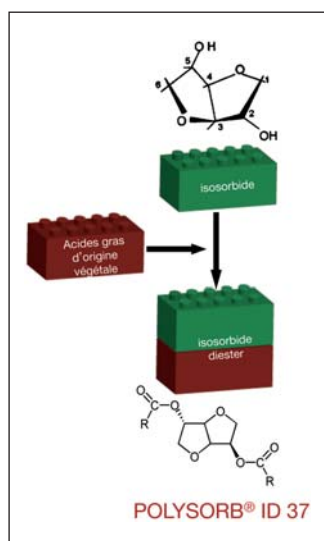


Figure 12

Produits fabriqués par Roquette et leurs applications.

Figure 13

POLYSORB® ID 37 est un mélange de diesters obtenu à partir de l'estérification de l'isosorbide avec les acides gras (100 % bio-sourcé, acide gras d'origine végétale, isosorbide obtenu par déshydratation du sorbitol, 0 % phtalates).

écoles, milieux hospitaliers, crèches etc. Le marché des phtalates est actuellement de 6 millions de tonnes par an, ce qui donne la mesure des perspectives ouvertes à l'isosorbitol ou ses dérivés.

4.2.2. L'acide succinique

L'acide succinique bio-sourcé a été développé en commun par Roquette et DSM dans le cadre du programme BioHub, effort qui a résulté en la création de la filiale Reverdia. C'est un diacide capable de réagir avec des diols pour substituer d'autres acides ou diacides et

permettre la synthèse de polymères biodégradables.

Il est intéressant de noter que la biosynthèse de l'acide succinique, qui se fait par fermentation avec une levure résistante en milieu acide (*Figure 14*), est de ce fait particulièrement efficace : on ne passe pas par l'étape de production d'un sel, succinate de sodium ou d'ammonium, mais l'on produit directement l'acide succinique. La *Figure 15* recense les applications envisagées ou en cours pour l'acide succinique. Par exemple, son introduction dans les semelles de chaussures en polyuréthane

Figure 14

Biosynthèse et utilisation de l'acide succinique.

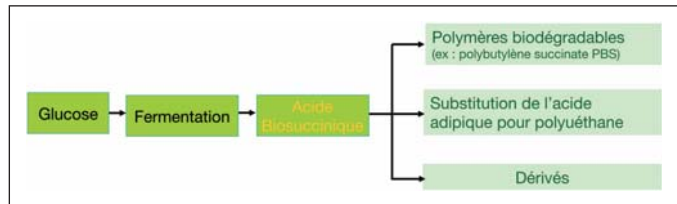
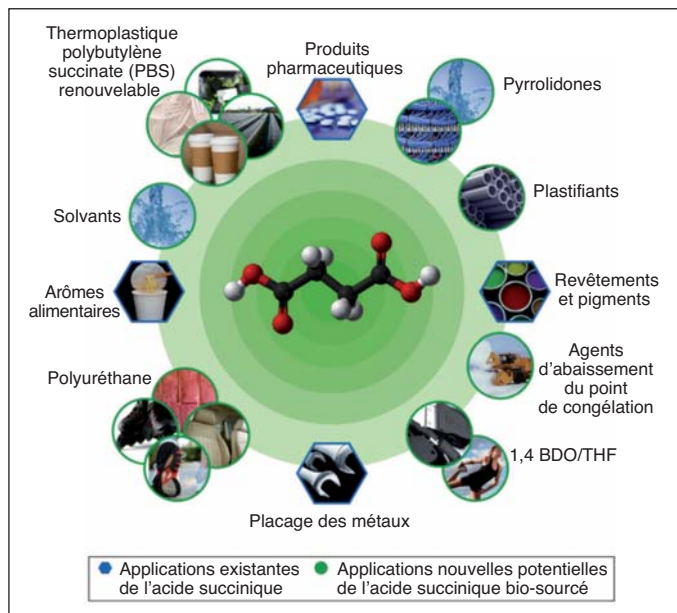


Figure 15

Applications envisagées ou en cours pour l'acide succinique.



est déjà commercialisée. Le marché de l'acide succinique, à 30 000 tonnes par an, est encore très faible, car son prix élevé en chimie à base de pétrole n'encourageait pas la recherche de ses applications.

4.2.3. Nouveaux plastiques végétaux

Le marketing met en avant la mise au point de bouteilles en plastique d'origine végétale, comme Coca-cola et Volvic. Il s'agit dans les deux cas de l'utilisation d'éthylène glycol

provenant d'éthanol. Roquette vise une solution locale à partir d'amidon et a développé une gamme appelée *Gaialene*[®] (Figure 16), constituée d'alliages d'amidon et de polymères classiques ayant à 50 % au moins une origine bio-sourcée. Une usine de 25 000 tonnes par an a été construite et réalise maintenant la production de tels polymères sous la forme de films et qui se prête à l'extrusion-soufflage ou à l'injection-moulage, procédés

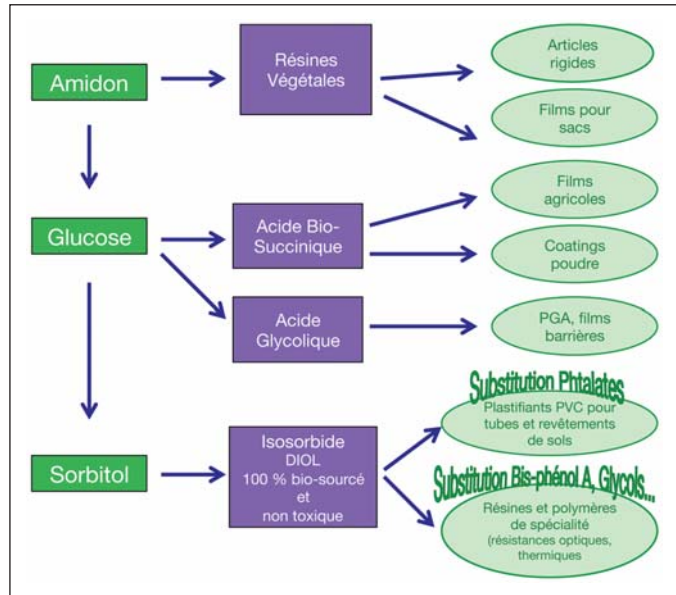


Figure 16

Les plastiques végétaux *Gaialene*[®], faits de résines végétales thermoplastiques.

Figure 17

Les solutions végétales de Roquette pour la chimie.



d'accès vers une grande diversité d'objets.

Le résumé des lignes de production de Roquette en chimie du végétal est donné sur la **Figure 17**.

5 L'Association Chimie du Végétal (ACV), une initiative emblématique

L'Association Chimie du Végétal⁸ illustre bien comment le milieu se prépare à l'essor de ce champ de la chimie prometteur pour le moyen terme, comme nous l'avons vu tout au long de ce chapitre. Elle joue aussi un rôle exemplaire en matière d'organisation de l'innovation, qui peut s'appliquer à beaucoup d'autres domaines. Aujourd'hui, les fédérations et syndicats sont sectoriels ; il existe un syndicat des amidons, un des huiles, un des savons et détergents, etc. : une véritable structure en si-

los. L'association se veut être une structure transverse, reliant tous les acteurs de la filière, de la biomasse jusqu'au produit fini pour développer des solutions bio-sourcées. Elle compte aujourd'hui une quarantaine d'adhérents représentant toutes les filières [céréalières, végétale avec Sofiprotéol, cellulosique, etc.], ainsi que les chimistes, des pôles de compétitivité comme Axelera ou IAR, et des utilisateurs chimistes.

L'association se fixe le but de créer un environnement favorable à l'émergence de nouveaux projets et se tient en contact avec les organismes publics ou privés compétents : des Instituts d'excellence d'énergie décarbonée (IEED), l'Institut Français des matériaux agro-sourcés (IFMAS), l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), etc. Des propositions sont à l'élaboration dans ces collaborations multiples

UN INDICATEUR DU TAUX DE BIO-SOURCÉ

L'ambition est de pouvoir facilement déterminer si un matériau est fabriqué à partir de matières bio-sourcées et dans quelle proportion.

La différence de teneur en isotope 14 du carbone d'origine végétale ou du carbone fossile fournit un test sur des cas simples, par exemple le polyéthylène ou l'éthylène.

Pour un végétal où l'oxygène est aussi abondant que le carbone, le test renseigne sur l'origine du carbone, mais ne dit pas si le produit vient de la chimie du végétal.

L'ACV a mis au point un test complet qui est en cours de certification et sera communiqué en juste temps.

et seront relayées au niveau national et européen.

Parmi les mesures mises en place par l'ACV, on compte un indicateur du taux de bio-sourcé (**Encart : « Un indicateur du taux de bio-sourcé »**).

« À ce stade, et en tant que président de cette association, je souhaite faire passer avec une certaine gravité un message à toute la communauté afin qu'il ait le plus de chances possible d'inspirer nos politiques à tous les niveaux. La politique française de soutien des activités en chimie du végétal risque

fort d'échouer car elle néglige un échelon-clé, celui des premières unités industrielles ! On compte nombre de nouvelles opérations inventées et développées en France, mais industriellement construites à l'étranger où elles pouvaient trouver l'aide financière dont on ne peut se passer à ce stade. Alors que les chances de la France dans ce domaine d'avenir sont fortes et reconnues, nous risquons d'échouer sur une question de pertinence d'affectation du soutien public. »
[C. Rupp-Dalhem, 25 janvier 2012].

Chimie du végétal : pilier de la bioéconomie du futur ?

Le concept de bioéconomie, bien en vogue à Bruxelles depuis quelques années, met en avant l'importance que prendront progressivement les techniques et les industries liées aux sciences de la vie et les atouts que possède l'Europe pour occuper une bonne place dans ce domaine. La **Figure 18** rappelle les principales composantes de la bioéconomie. On note bien sûr, pour renforcer le propos développé dans

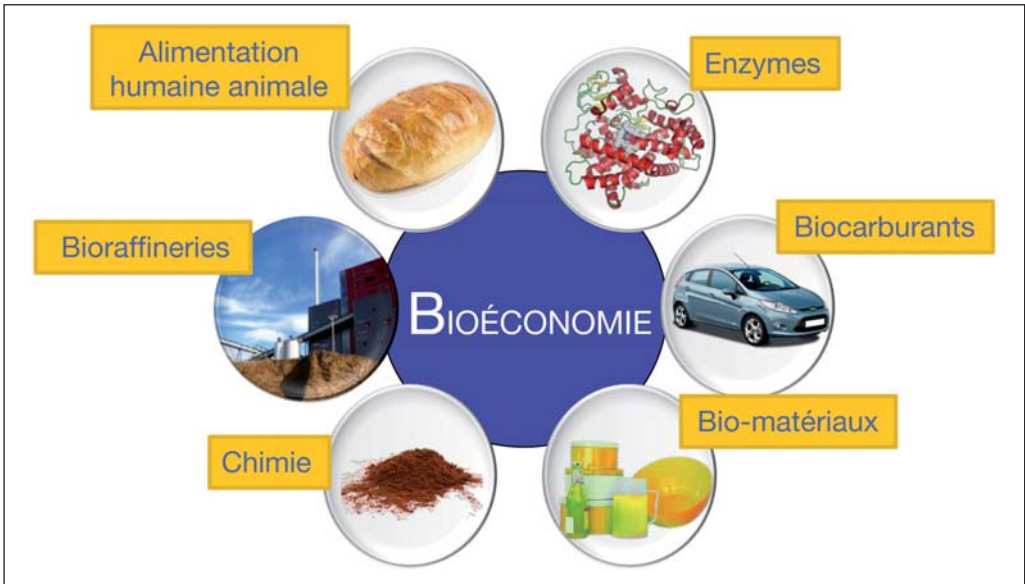


Figure 18

La Chimie du végétal : fer de lance de la « chimie durable ».

ce chapitre, que la chimie du végétal occupe la position centrale dans ce schéma. Une incitation supplémentaire pour se convaincre de la dimension de l'enjeu.

Crédits photographiques

Fig. 1A : cliché ministère de la Culture et de la Communication, Direction régionale des affaires culturelles de Rhône-Alpes, Service régional de l'archéologie.

Fig. 7 : d'après le Cefic Chemdata International.

Figs. 11 et 16 : ROQUETTE Frères S.A. - Tous droits réservés, Pour tous pays.