

Agriculture et chimie : une synergie plus que séculaire !

Catherine Regnault-Roger est Professeur émérite à l'université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA E2S) ainsi que membre des Académies d'agriculture de France et nationale de Pharmacie & du Conseil scientifique du Haut Conseil des biotechnologies.

1 Introduction

Afin de se nourrir de manière moins aléatoire et plus consistante, l'Homme inventa l'agriculture ce qui lui permit de compléter les ressources incertaines que lui procuraient la cueillette et la chasse. Il mit ainsi en œuvre une production plus pérenne d'espèces végétales ou animales sélectionnées. Les avancées de la connaissance scientifique et des technologies ont contribué à donner à l'agriculture le visage qu'elle a aujourd'hui. Dans cette évolution, la chimie a joué un rôle incontournable parmi les disciplines qui ont été décisives pour qu'à la fin du xx^e siècle, le spectre de la faim s'éloigne d'une large majorité de l'humanité.

2 L'agriculture avant le xvii^e siècle : empirisme et pragmatisme

Dès le Néolithique, la domestication des plantes et des animaux a constitué un premier enjeu pour s'affranchir des aléas de la cueillette et de la chasse. Avec l'agriculture, une sélection génétique empirique est mise en œuvre pour avoir des récoltes plus abondantes et de meilleure qualité nutritive ou sanitaire, ou pour élever des troupeaux plus résistants aux maladies et meilleurs producteurs de viande ou de lait pour se nourrir. Ainsi furent opérés des croisements entre les espèces végétales et animales qui présentaient les meilleurs caractères pour répondre aux besoins des producteurs et des

consommateurs, tout d'abord par des pratiques empiriques, puis de façon plus raisonnée et rationnelle avec les progrès de la connaissance scientifique. Le brassage génétique entre les espèces ou des variétés s'effectue entre les espèces ou des variétés sexuellement compatibles et s'accompagne de l'apparition de nouvelles espèces, pour certaines infertiles. En témoigne l'existence de mulet obtenu par le croisement de l'âne et du cheval pour obtenir un animal alliant la force du cheval et la robustesse de l'âne : ce croisement a été décrit dès la plus Haute Antiquité.

L'exemple de la domestication du maïs (*Zea mays*) en Amérique latine s'accompagne d'une modification considérable de la phénologie de l'espèce. Les premières civilisations amérindiennes de l'Amérique centrale cultivent une plante bien adaptée au climat qui est le leur, chaud et humide : la téosinte. Cette céréale, à l'origine sauvage, leur fournit de la farine pour se nourrir. Génération après génération,

les cultivateurs vont sélectionner les plantes qui ont les plus beaux épis, et les épis qui ont le plus grand nombre de grains et qui donnent le plus de farine, et aussi les plantes qui résistent le mieux aux variations du climat, les pluies, le froid ou la sécheresse. Ils croisent des individus qui ont les meilleures qualités. Progressivement, la plante cultivée est devenue plus forte dans son environnement et plus productive. Une modification se constate dans l'apparence de la plante. Les épis de la téosinte presque filiformes et marron, se sont épaissis, sont devenus ventrus et jaunes, sont devenus ventrus et jaunes avec un nombre considérable de grains : les premiers maïs étaient nés. Par la suite, l'adaptation à d'autres milieux, résultant de la sélection opérée par les hommes et de mutations spontanées, donna diverses populations avec des apparences différentes de couleur ou de taille des épis (Figure 1).

Basée sur des observations judicieuses, l'agriculture s'enrichit au fil du temps d'un savoir, au départ pragmatique, puis de plus en plus raisonné reposant sur la compréhension des phénomènes et du fonctionnement des milieux agricoles et des organismes vivants que sont les plantes cultivées et le bétail. Ainsi les paysans de la région de Rouen remarquent dans les années 1650 que les champs de blé (*Triticum* spp.) bordés par des haies intégrant dans leur végétation de l'épine-vinette (*Berberis vulgaris* L.), un petit arbuste mellifère, sont atteints plus souvent d'une maladie – la rouille noire – que ceux qui n'ont pas d'épine-vinette dans leur environnement. Ils

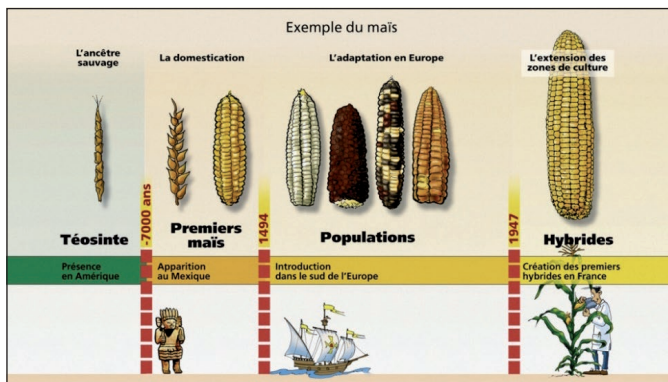


Figure 1

Domestication du maïs. Source : illustration du GNIS avec son aimable autorisation.

décident d'arracher l'arbuste et la rouille noire qui affectait la culture des blés disparaît. Mais ce n'est que deux siècles plus tard que le phénomène recevra une explication scientifique avec les travaux de celui qui est considéré comme le père de la phytopathologie, Heinrich Anton de Bary, botaniste, microbiologiste et mycologiste allemand (1831-1888) qui démontra que la maladie de la rouille noire était provoquée par un champignon pathogène, *Puccinia graminis*. Ce parasite a besoin de deux hôtes pour son développement : le blé et l'épine-vinette. Éradiquer l'épine-vinette autour des champs de blé permet d'interrompre le cycle du champignon et d'éviter la maladie.

3 Le Siècle des Lumières permet l'essor de la chimie moderne et de la chimie agricole

L'avènement de l'agriculture a transformé la façon de vivre des hommes et des milieux les environnant. Mais ce sont

les avancées de la connaissance scientifique et des technologies qui ont donné à l'agriculture le visage qu'elle a aujourd'hui. Le développement d'une agriculture moins tâtonnante et plus productive repose dès le XIX^{e} siècle sur l'essor des connaissances en chimie, physique et biologie, au XX^{e} siècle en génétique, biochimie, biologie moléculaire avec la découverte de la structure chimique de l'ADN qui ouvrit la porte à la génomique, aux biotechnologies et au génie génétique, et au XXI^{e} siècle en informatique et numérique avec l'intelligence artificielle. Cet essor a été rendu possible grâce aux réflexions des grands philosophes et scientifiques du Siècle des Lumières au XVIII^{e} siècle.

Parmi eux, Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794), chimiste, philosophe, économiste est considéré comme le père de la chimie moderne (Figure 2). Il développe la méthode scientifique basée sur les expérimentations et les mathématiques, l'épistémologie et l'analyse statistique. Il s'appuie sur la

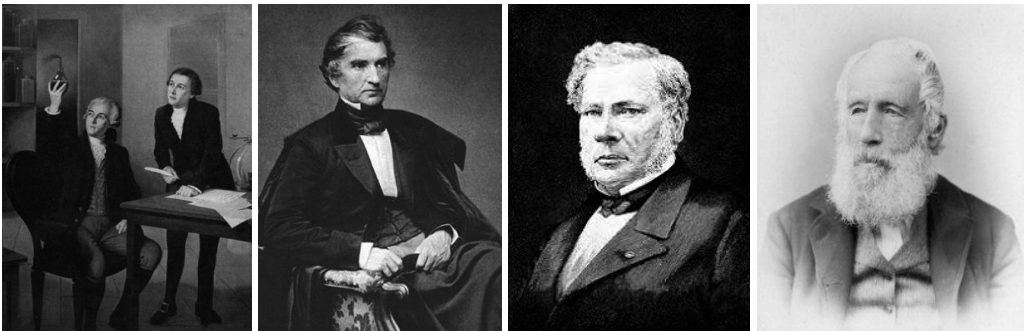


Figure 2

Les pères de la chimie moderne et agricole : Antoine Lavoisier avec son assistant Dupont de Nemours - Justus von Liebig - Jean-Baptiste Boussingault - John Bennet Lawes (de gauche à droite).

notion d'élément chimique pour établir la cohérence des équilibres chimiques et les traduit en réactions représentées par des équations chimiques qui respectent la conservation de la matière, dont il établit la loi. Outre son œuvre fondamentale qui est consignée dans deux traités majeurs que sont la *Méthode de nomenclature chimique* (1787) et le *Traité élémentaire de Chimie* (1789), Lavoisier est un agronome manqué. En effet, il applique à un domaine agricole qu'il a acquis la méthode expérimentale scientifique qu'il avait développée en chimie, mais il fut décapité pendant la Terreur au cours la première Révolution française, sans qu'il ait pu achever d'écrire son traité d'agriculture.

Au XIX^e siècle, le flambeau fut repris par trois scientifiques pionniers qui s'illustrèrent dans le domaine de la chimie agricole : l'allemand Justus von Liebig (1803-1873), le français Jean-Baptiste Boussingault (1801-1887) ainsi que l'anglais John Bennet Lawes (1814-1900) (Figure 2). Basés sur la méthode expérimentale définie par Lavoisier, les travaux des deux premiers apportèrent, malgré des querelles scientifiques sur le rôle du phosphore, des contributions majeures à la chimie organique et à l'agronomie pour comprendre l'importance des éléments naturels (eau, soleil, minéraux) dans la croissance de la plante et l'augmentation des rendements, ce qui permit de développer les notions d'engrais et de fertilité des sols. Von Liebig publia un ouvrage majeur en 1840 intitulé *Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur*

und Physiologie/Chimie organique appliquée à l'Agriculture et la Physiologie végétale et Boussingault en 1860 un traité *Agronomie, chimie agricole et physiologie*. En Angleterre, Sir John Bennet Lawes développa à partir de 1843 des expérimentations de terrain sur le rôle des superphosphates au *Rothamsted Manor* qui deviendra par la suite un centre de recherche de référence mondial le *Rothamsted Research Center*.

Tous ces travaux et ceux qui suivirent ont permis d'appréhender la structure physico-chimique des organismes vivants, le fonctionnement intime des cellules et des organes et de mettre en évidence qu'il existait les métabolismes, c'est-à-dire des changements dynamiques complexes au sein des cellules et des êtres vivants. Il apparut alors nécessaire de différencier la chimie appliquée aux êtres vivants de la chimie en général, et Carl Neuberg (1877-1956) proposa le terme de biochimie en 1903. La biochimie, grâce à de nouveaux appareils de mesure, d'observation et d'analyse des constituants chimiques, démontre qu'il existe des processus de transformation physiologiques et cellulaires basés sur des réactions chimiques complexes comme le cycle de Krebs découvert en 1937. La chimie analytique qui se perfectionne avec des instruments de mesure de plus en plus précis et sophistiqués (spectromètre, chromatographe etc.) contribue à mieux comprendre les phénomènes de transformation au sein des organismes vivants. Ainsi, on sait aujourd'hui que

les engrais à base d'azote, de phosphore et de potassium sont indispensables au développement des plantules. La protection des cultures contre leurs bio-agresseurs que sont les micro-organismes pathogènes, les insectes ravageurs ou encore les adventices indésirables, nécessite de comprendre l'essence des interactions et les mécanismes des relations au sein des populations ou d'une espèce, et entre les espèces. La communication entre les organismes au sein des écosystèmes met en jeu des médiateurs chimiques comme les phéromones qui sont étudiés par une nouvelle discipline, l'écologie chimique, qui vit le jour en 1970 à la suite des travaux d'Ernest Sondheimer et John B. Simeone aux États-Unis ainsi que de Jeffrey B. Harborne (1928-2002) en Angleterre qui travailla sur la phytochimie (Figure 3).

4 De la compréhension à l'action : exemple de la protection des cultures

Très tôt, l'utilisation de ces nouvelles connaissances se prolongea par des applications pratiques, en médecine humaine et vétérinaire, dans le domaine pharmaceutique mais aussi phytopharmaceutique. Ce dernier est aujourd'hui très contesté par une minorité militante très médiatique qui vise à bannir de l'agriculture l'emploi des substances actives de synthèse chimique dans le domaine de la santé du végétal. Cette contestation est-elle justifiée ? Essayons de poser quelques repères.

4.1. Au début du xx^e siècle, une pharmacopée de produits minéraux

Dès la deuxième moitié du xix^e siècle, se développa

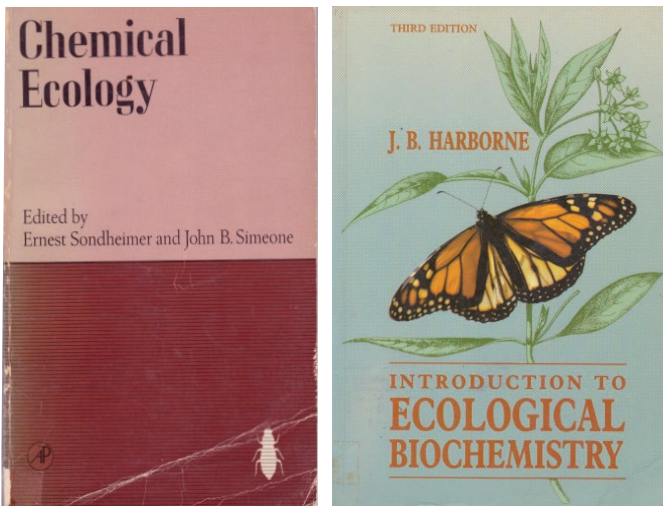


Figure 3

Deux livres majeurs du xx^e siècle pour comprendre les relations entre les organismes vivants.

l'utilisation des premiers produits chimiques pour protéger les cultures agricoles contre les ravages et les maladies. Le cas d'école de cette approche est sans conteste la bouillie bordelaise, une « *préparation à base de sulfate de cuivre et de chaux hydratée, elle est mise au point par deux scientifiques bordelais, professeurs à la faculté des sciences de Bordeaux, le botaniste Alexis Millardet et le chimiste Ulysse Gayon, après de nombreux essais dans leurs laboratoires et des expérimentations dans le vignoble du château Ducru-Beaucaillou à Saint-Julien-en-Médoc. L'idée leur en était venue après l'observation fortuite que les vignes sulfatées en bordure de parcelles pour décourager les voleurs de raisins, étaient moins attaquées par le mildiou. L'utilisation de la bouillie bordelaise en 1885, contre le mildiou de la vigne qui avait envahi le vignoble du Sud-Ouest depuis 1878, connut un succès immédiat. Dès 1886, le mildiou était considéré comme jugulé. L'emploi du sulfate de cuivre fut par la suite étendu pour lutter contre les mauvaises herbes en 1896¹ ».* De nombreuses formulations à base de sels de cuivre et d'autres minéraux furent par la suite recherchées et toute une pharmacopée à base d'éléments minéraux se développa, non sans conséquence parfois pour la santé des opérateurs, animaux et agriculteurs quand la solution retenue était particulièrement nocive comme

l'acide sulfurique pulvérisé comme produit de désherbage dans les champs.

4.2. Un contexte sociétal favorable

C'est à la même période que se structura une industrie chimique puissante avec des grands groupes qui interviennent sur plusieurs pays. À côté des sociétés CIBA (*Chemische Industrie BAsel*) en Suisse, *Allied Chemicals* aux États-Unis, le groupe allemand *IG Farben Industries AG* qui rassemble en 1925 plusieurs sociétés avec des participations aux États-Unis, en Scandinavie et en Suisse et un effectif de 100 000 travailleurs. En Grande-Bretagne, la compagnie *ICI Imperial Chemical Industries* réunit quatre sociétés en décembre 1926. Ces grands groupes chimiques, qui interviennent dans de nombreux secteurs, privilégient au départ au niveau agricole la fabrication des engrais dont on voit mieux immédiatement les améliorations des rendements qui suivent les applications dans les parcelles. Ce qui génère un formidable potentiel commercial ! Mais ces entités industrielles puissantes vont très vite prendre la mesure d'un nouveau secteur à développer, celui des produits phytopharmaceutiques (encore appelés pesticides à usage agricole) organiques de synthèse qu'elles vont investir avec une capacité de recherche à la hauteur de leurs grands moyens.

C'est dans ce contexte qu'arriva la Seconde Guerre mondiale, au cours de laquelle les marchés d'approvisionnement traditionnels de produits phytopharmaceutiques à base

1. Catherine Regnault-Roger (2018), « Révolutions agricoles et santé des plantes » ; In *Santé du végétal : 100 ans déjà !* (sous la direction de Regnault-Roger C. et Fougeroux A.), p.17-46.

d'extraits végétaux en provenance des empires coloniaux ou du Japon ont été perturbés et qui s'illustra par l'utilisation d'un composé organochloré, le DDT ou dichlorodiphényltrichloroéthane, synthétisé par le strasbourgeois Zeidler dès 1874 et dont les propriétés insecticides ont été découvertes en 1939 par le chimiste suisse Paul Hermann Müller de la société Geigy située à Bâle. Son emploi contre les poux dans les camps de réfugiés et de prisonniers en Afrique du Nord et au cours de la campagne d'Italie des Alliés contre l'armée allemande (notamment lors du siège de Naples où fut jugulée grâce à lui une épidémie de typhus qui frappait l'armée américaine) a épargné bien des vies et a amélioré la situation sanitaire difficile de ces temps de guerre. L'armée américaine qui détenait ce produit donné par les Suisses, l'avait d'ailleurs classé « secret-défense ». À la fin de la guerre, le succès de cet insecticide devint mondial quand il fut employé avec succès en Inde contre la malaria (paludisme) transmise par les moustiques. Il fut utilisé également au niveau agricole pour lutter contre les insectes qui ravageaient les cultures comme les doryphores que les écoliers devaient avant-guerre ramasser à la main dans des corvées d'hannetonage commandées par les préfets.

4.3. La « Belle Époque » des produits phytopharmaceutiques organiques de synthèse

De laborieuse, la lutte contre les ravageurs et les insectes

vecteurs de maladies devint plus aisée. La publication des rapports de recherche et des brevets ayant été suspendue pendant la guerre, on assista à l'arrivée sur le marché d'un grand nombre de substances actives. Outre les organochlorés comme le DDT, les carbamates dont les premières molécules insecticides avaient été mises au point dès 1931 par la société Du Pont de Nemours et les premiers insecticides organophosphorés mis au point par la recherche allemande pendant la guerre à partir des gaz de combat, les sarin et tabun.

Ces trois grandes familles de composés phytopharmaceutiques de l'immédiate après-guerre (organochlorés, organo-phosphorés et carbamates) apparaissent alors comme une véritable panacée : ce sont des produits pas chers, faciles à manipuler et efficaces. Leur utilisation a bouleversé le paysage de la production agricole. Le travail des agriculteurs en devient plus aisé. La qualité sanitaire des récoltes s'améliore. Ainsi ces produits phytopharmaceutiques de synthèse orientèrent de manière décisive la lutte phytosanitaire, d'autant plus que l'infrastructure industrielle est là pour les produire et les diffuser afin de satisfaire la demande collective.

Cependant, par manque de connaissance, ces succès se sont accompagnés dans certaines situations d'effets environnementaux négatifs comme la rémanence dans les milieux qui peut se traduire par des phénomènes de bioaccumulation pouvant donner lieu à des résidus de pesticides dans

l'alimentation, et des phénomènes de bioamplification au niveau de la chaîne trophique. C'est ainsi qu'il a été constaté que la reproduction d'espèces, notamment d'oiseaux piscivores comme le goéland argenté (*Larus argentatus*) pouvait être compromise. Leurs coquilles d'œufs étaient fragilisées, ce qui réduit les éclosions. C'est ce phénomène que Rachel Carson, biologiste marine américaine, dénonça dans son livre *Silent Spring* paru en 1962 et qui eût un écho mondial.

4.4. La fin du xx^e siècle s'accompagne d'un changement de paradigme

Une prise de conscience s'opéra alors qu'il fallait repenser l'emploi des produits phytopharmaceutiques. Et dès les années 1970, plusieurs actions ont été conduites pour diminuer l'impact environnemental des substances actives phytosanitaires, parmi lesquelles :

- la réduction des quantités de produits épandus en modifiant les pratiques agricoles et les itinéraires techniques, ou en améliorant la précision des épandages avec du matériel plus précis de distribution des pulvérisations (buses par exemple) et une localisation grâce à des caméras embarquées sur les tracteurs et des tronçons de pulvérisateurs commandés qui permettent de délivrer la bonne dose, au bon endroit et au bon moment ;
- la collecte des emballages vides des produits phytosanitaires ou des films utilisés en protection des cultures, leur

recyclage dans des filières qui créent de nouveaux matériaux et la gestion des effluents et des déchets phytopharmaceutiques. Cette activité est pilotée par l'organisme ADIVALOR, créé à l'initiative de l'interprofession phytopharmaceutique française (Union de l'Industrie de Protection des Plantes), et qui vient de fêter son vingtième anniversaire. Elle a créé un cycle vertueux d'actions environnementales ;

- l'innovation pour améliorer le profil environnemental des substances actives chimiques mais aussi biologiques de contrôle des bioagresseurs. Dans l'Union européenne, une procédure de ré-homologation des produits phytopharmaceutiques, commencée en 1992 s'est achevée en 2008 avec une diminution des deux tiers des produits autorisés ;

- le développement de l'agriculture de précision avec de nouveaux outils d'aide à la décision, une gestion satellitaire ou par drone s'appuyant sur une agriculture connectée et numérique ;

- le développement de la recherche communautaire grâce à des programmes européens comme le programme ENDURE (*European network for the durable exploitation of crop protection strategies*) qui a été piloté par l'INRA pendant le 6^e Programme Cadre Européen de Recherche et Développement (PCRD) entre 2005 et 2010 et dont l'activité s'est prolongée en réseau (www.endure-network.eu) ;

- la mise en place de consortiums de recherche dans le cadre des partenariats public/

privé pour repenser l'emploi des substances phytopharmaceutiques dans le cadre de la protection intégrée ;

– le développement du dialogue entre spécialistes et professionnels, praticiens et citoyens comme l'illustre l'initiative « Siècle vert » (Figure 4).

On sait aujourd'hui que la protection des cultures se doit d'intégrer toutes les stratégies dans une approche combinatoire. À côté de l'utilisation des substances phytopharmaceutiques minérales ou organiques de synthèse, y ont toute leur place les stratégies de biocontrôle (confusion sexuelle par phéromone, lutte

biologique par arthropodes parasitoïdes ou prédateurs ou par micro-organismes, allomones et extraits végétaux), l'agroécologie, le perfectionnement du machinisme agricole, le développement de l'agriculture numérique et connectée, et les biotechnologies avec les nouvelles technologies d'édition du génome dont la technique phare, le CRISPR (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*) inventée par Emmanuelle Charpentier et Jennifer Doudna en 2012 et pour laquelle elles ont été lauréates en 2020 du prix Nobel de chimie.

Conclusion

La chimie moderne, héritage d'Antoine Lavoisier, a joué un rôle fondamental pour comprendre comment fonctionnent les êtres vivants dans leur intimité cellulaire et dans les relations qui existent entre les espèces. De ce fait, elle a accompagné l'évolution de l'agriculture et s'est révélée indispensable, non seulement pour faire reculer les frontières de la connaissance et interpréter scientifiquement des phénomènes observés, mais aussi pour fournir des solutions pour améliorer les productions agricoles animales et végétales. L'agriculture doit répondre aujourd'hui à une double exigence : augmenter sa productivité pour nourrir 10 milliards d'habitants à l'horizon 2050 et respecter la finitude de la planète en protégeant son environnement et préservant les milieux physico-chimiques dans lesquels nous vivons.



Figure 4

Trois initiatives pour repenser l'utilisation des produits phytosanitaires : la recherche (ENDURE) – la gestion des déchets (ADIVALOR) – le dialogue sociétal (Siècle vert).

Les ressources de l'ingéniosité humaine sont inépuisables en termes de créativité et d'innovation et les progrès de la connaissance scientifique le démontrent. Aujourd'hui, une compréhension plus étayée des phénomènes développe de nouvelles façons d'agir. Elles doivent mobiliser toutes les compétences scientifiques et technologiques sans *a priori* idéologique. De ce survol historique, une évidence s'impose : la chimie est bien la discipline-clef pour comprendre l'évolution de l'agriculture. Bien plus, c'est aussi un outil incontournable pour sa durabilité.

Bibliographie recommandée

Bain Christian, Bernard Jean-Louis, Fougeroux André (2010), *Histoire de la protection des cultures de 1850 à nos jours*, Éditions Champs Libres, 255 pages.

Boulaine Jean (1996), *Histoire de l'agronomie en France*, Éditions Lavoisier, 437 pages.

Regnault Henri, Arnaud de Sartre Xavier, Regnault-Roger Catherine (2012), *Révolutions agricoles en perspective*, Éditions France agricole, 189 pages.

Regnault-Roger Catherine (2005), *Enjeux phytosanitaires pour l'agriculture et l'environnement*, Éditions Lavoisier, 1013 pages.

Regnault-Roger Catherine (2014), *Produits de protection des plantes*, Éditions Lavoisier, 353 pages.

Regnault-Roger Catherine, Fougeroux André (2018), *Santé du végétal, 100 ans déjà !*, Éditions Presses des Mines, 177 pages.