

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France



Volume 11 (2021)



Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France

18, rue de Bellechasse 75007 Paris, France

Tél. : +33 (0)1 47 05 10 37 Fax : +33 (0)1 45 55 09 78

<https://www.academie-agriculture.fr>

Soumission électronique : notes-academiques@academie-agriculture.fr

Rédaction : Académie d'agriculture de France - 18, rue de Bellechasse, 75007 Paris, France

Objet de la revue : Les *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France* sont un journal semestriel d'information et de formation scientifiques, sous la direction du Secrétaire perpétuel de l'Académie d'agriculture de France.

La revue - avec ses éditoriaux, articles originaux, articles d'actualité, notes de conjoncture, publication de fond, revues de la littérature, synthèses, rapports, commentaires critiques d'ouvrage, opinions, textes de conférences, lettres à la rédaction, etc.- donne une information actualisée ayant trait à tous les domaines couverts par les dix sections de l'Académie d'agriculture de France.

Soumissions électroniques : notes-academiques@academie-agriculture.fr

Directeur de la publication : le Secrétaire perpétuel de l'Académie d'agriculture de France

Secrétaires éditoriaux : Yves Brunet, Noëlle Dorion, Hervé This, Nadine Vivier

Comité éditorial : Claude Allo (Secrétaire de section), Bernard Ambolet (Secrétaire de section), Catherine Aubertin (Secrétaire de section), Guilhem Bourrié (Secrétaire de section), Yves Brunet, Noëlle Dorion, Michel Dron (Secrétaire de section), Christian Ferault, André-Jean Guérin (Secrétaire de section), Malcolm Hadley, Bruno Hérault, Philippe Kim-Bonbled, Gilles Lemaire, Nicole Mathieu, Marie-Claude Maurel, Jean-Claude Mounolou, Alain Pavé, Jean-Marie Pierre-Guy, Agnès Ricroch (Secrétaire de section), Bernard Roman-Amat (Secrétaire de section), Jean-Marie Séronie (Secrétaire de section), Hervé This, Sophie Villers (Secrétaire de section), Nadine Vivier.

Informations à l'attention des auteurs : Pour toute question relatives à la soumission des articles , les auteurs peuvent consulter les conseils aux auteurs disponibles à :

<https://www.academie-agriculture.fr/publications/notes-academiques/les-notes-academiques-de-lacademie-dagriculture-de-france-n3af-sont>

ISSN 2966-702X (printed)/ eISSN 2967-2139 (electronic),

DOI : <https://doi.org/10.58630/pubac.not.17611>

Academic Notes of the French Academy of Agriculture

18, rue de Bellechasse 75007 Paris, France

Tel: +33 (0) 1 47 05 10 37 Fax: +33 (0) 1 45 55 09 78

<https://www.academie-agriculture.fr>

Electronic submission: notes-academiques@academie-agriculture.fr

Publication: French Academy of Agriculture - 18, rue de Bellechasse, 75007 Paris, France

Purpose of the review: The *Academic Notes of the French Academy of Agriculture* is a journal of information and scientific training, under the direction of the Permanent Secretary of the Academy of Agriculture of France.

The journal - with its editorials, original articles, news articles, business reports, background publications, literature reviews, summaries, reports, critical reviews, opinions, conference texts, letters to the editor, etc. - gives an updated information relating to all the fields covered by the ten sections of the French Academy of Agriculture.

Electronic Submissions: notes-academiques@academie-agriculture.fr

Director of the publication: Perpetual Secretary of the French Academy of Agriculture

Associate Editors: Yves Brunet, Noëlle Dorion, Hervé This, Nadine Vivier

Editorial Committee: Claude Allo (Secrétaire de section), Bernard Ambolet (Secrétaire de section), Catherine Aubertin (Secrétaire de section), Guilhem Bourrié (Secrétaire de section), Yves Brunet, Noëlle Dorion, Michel Dron (Secrétaire de section), Christian Ferault, André-Jean Guérin (Secrétaire de section), Malcolm Hadley, Bruno Hérault, Philippe Kim-Bonbled, Gilles Lemaire, Nicole Mathieu, Marie-Claude Maurel, Jean-Claude Mounolou, Alain Pavé, Jean-Marie Pierre-Guy, Agnès Ricroch (Secrétaire de section), Bernard Roman-Amat (Secrétaire de section), Jean-Marie Séronie (Secrétaire de section), Hervé This, Sophie Villers (Secrétaire de section), Nadine Vivier.

Information for authors: For any questions regarding the submission of manuscripts, authors may consult the advice to authors available at:

<https://www.academie-agriculture.fr/publications/notes-academiques/les-notes-academiques-de-lacademie-dagriculture-de-france-n3af-sont>

ISSN 2966-702X (printed)/ eISSN 2967-2139 (electronic),

DOI : <https://doi.org/10.58630/pubac.not.17611>

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France

Académie d'agriculture de France

Volume 11, 2021

<https://doi.org/10.58630/pubac.not.v655672>

- **Hervé This.** 2021. La rigueur terminologique pour les concepts de la chimie : une base pour des choix de société rationnels / Terminological rigor for chemistry concepts: a basis for rational societal choices, 11(1), 1-17, <https://doi.org/10.58630/pubac.not.a43610>
- **Judith Juvin, Marie-Charlotte Belhomme, Stéphanie Castex, Christophe Bliard et Arnaud Haudrechy.** 2021. Théories économiques et crises des marchés agricoles : l'exemple du lait / Economical theories and crisis of the agricultural market: the example of milk, 11(2), 1-9, <https://doi.org/10.58630/pubac.not.a994909>
- **Charlène Bouvier.** 2021. André Voisin dans le paysage de la recherche agronomique. La notion d'« années de misère » dans les années 1950 / André Voisin in the landscape of agricultural research. The notion of "years of misery" in the 1950s, 11(3), 1-12, <https://doi.org/10.58630/pubac.not.a663356>
- **Claude Debru.** 2021. Confiance, innovation, progrès, 11(4), 1-14, <https://doi.org/10.58630/pubac.not.a174557>
- **André Gallais.** 2021. Retour sur la définition d'un OGM en amélioration des plantes. Points de vue génétique et réglementaire / Review of the definition of a GMO in plant breeding. Genetic and regulatory points of view, 11(5), 1-15, <https://doi.org/10.58630/pubac.not.a621966>

La rigueur terminologique pour les concepts de la chimie : une base pour des choix de société rationnels

Terminological rigor for chemistry concepts: a basis for rational societal choices

Hervé This ¹

¹ INRAE, UMR 0782 SayFood, France.

Correspondance :

Groupe de gastronomie moléculaire, AgroParisTech, 16 rue Claude Bernard, Paris France

herve.this@inrae.fr

Résumé

Les prises de décisions qui engagent les collectivités en matière d'alimentation se fondent souvent sur le maniement de concepts de chimie. S'impose, de ce fait, une rigueur terminologique qui ne laisse pas de place aux doutes quant à la nature des objets dont on discute. Cet article examine des exemples fréquents de confusions dues à des abus de langage, et il conclut avec un appel au renforcement des enseignements de chimie soutenus, introduits dès l'école primaire.

Abstract

Food-related decisions that engage communities are often based on chemical concepts. Therefore, the utmost terminological rigour is required. This article considers

frequent examples of confusion, and concludes with a call for the introduction of chemistry lessons as early as primary school.

Mots clés

chimie, alimentation humaine, débat public, rigueur, terminologique, molécule, composé, acide gras, triglycéride, minéraux, produit naturel, dénomination chimique

Keywords

chemistry, human food, public debate, controversies, terminological rigor, molecule, compound, fatty acid, triglyceride, minerals, natural product, chemical denomination

Introduction

Les débats publics à propos d'alimentation, notamment dans les médias, concernent souvent des objets de la chimie : nitrates, nitrites (Pouliquen, 2020), acides gras (INSERM, 2020), glyphosate (Foodwatch, 2020), acrylamide (Cérou, 2020), fer (Santé Magazine, 2020), curcumine (Lacamp, 2020), ADN (Bru, 2020), « sels minéraux » (Mary, 2020), pesticides (Foodwatch, 2020), microplastiques (Anses, 2020a), nano-particules (Anses, 2020b)... Hélas certains de ceux qui interviennent dans ces débats sont ignorants de la nature exacte de ces composés ou produits, ou bien en ont des perceptions connotées négativement, comme la consultation des références données ci-dessus le montre à l'envi ! Notamment la croyance en une « bonne nature » - qui oublie par exemple les poisons naturels tels que la ciguë ou le datura - n'est pas neuve (Mill, 1874), mais elle continue de sévir, en même temps que se font entendre des craintes souvent infondées (Kressmann, 2018).

La mauvaise connaissance des objets de la chimie est délétère, dans les débats publics où ces objets interviennent, car elle peut conduire à des positions et à des choix irrationnels du public et des élus, puis à des lois qui risquent de régir la vie collective de façon inacceptable pour quiconque cherche plus de rationalité et une meilleure utilisation de l'argent public (Vaulpré et Jaffré, 2020). Déjà Nicolas de Condorcet écrivait, à une époque où la science était considérée comme une « philosophie naturelle » : « Toute société qui n'est pas éclairée par des philosophes est trompée par des charlatans » (Condorcet, 1791).

Certes des cours de chimie ont été introduits dans les enseignements de Collège, mais ils sont limités, et les enquêtes récentes montrent la faiblesse de la France, de ce point de vue (Cabioch, 2020), par rapport aux autres pays du

monde. Au-delà des questions de compétitivité industrielle nationale, ces formations sont indispensables aux citoyens pour qu'ils puissent se déterminer, dans le monde très technicisé où ils vivent aujourd'hui. Les jeunes devenant des adultes, et éventuellement, des élus, le Parlement a d'ailleurs jugé indispensable de conforter les connaissances scientifiques et technologiques des élus par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, créé au début des années 1980 (OPECST, 2020) : des informations et des formations scientifiques (notamment de chimie) contribuent à éviter les idées erronées, soit résultant d'*a priori* personnels, soit propagées par des groupes de pression... Et la question de la connaissance insuffisante des sciences, notamment de la chimie, est suffisamment grave pour qu'elle soit fréquemment considérée par les états et par les organisations internationales, notamment par l'UNESCO, qui s'est préoccupée de la vulgarisation des sciences de la nature dans les médias de service public (Naji, 2006).

Dans le présent article, nous analysons une série de confusions fréquentes, en vue de mieux discuter ensuite les raisons pour lesquelles de la rigueur terminologique s'impose, notamment pour les objets de la chimie. Nous nous adressons à des lecteurs formés aux sciences de la nature, mais pas tous chimistes, et nous examinons aussi des présentations à l'attention de citoyens qui n'ont pas toujours fait des études poussées en science, cherchant à montrer pourquoi ceux qui sont à même de faire des abus de langage pourraient utilement les éviter, dans les débats publics.

Nous souhaitons établir que la rigueur n'est jamais excessive pour discuter les questions qui font intervenir des objets de la chimie, sous peine de confusions qui feraient le lit d'idéologues ou de malhonnêtes, ou qui conduiraient aux peurs irraisonnées que nous avons évoquées.

Un florilège, avant de prendre du recul

1. Une première erreur courante, à propos de chimie, est l'abus de langage qui consiste à confondre les substances, les espèces chimiques (molécules ou ions, par exemple), les molécules (Myers, 2012). La chimie a longtemps hésité, avant de considérer - finalement- qu'une molécule est un assemblage d'atomes (et non pas d'« éléments », puisque ces derniers sont également des catégories), alors qu'un composé est une « espèce chimique », en l'occurrence une catégorie de molécules toutes identiques. Dire que l'eau est une molécule, par exemple, est faux, dans l'acception moderne du mot « molécule ». La confusion peut naître de ce que le mot « eau » désigne à la fois une substance matérielle et une catégorie moléculaire. En tant que substance, elle peut être en phase vapeur, ou liquide, ou solide, par exemple, selon les conditions de température et de pression (Lide, 2005). Cette matière est faite de très nombreuses molécules d'un composé nommé communément « eau », avec la confusion possible entre le nom du composé et le nom de la substance. L'eau, en tant que composé, est une catégorie de molécules toutes identiques : des dizaines de milliers de milliards de milliards de molécules identiques par gramme d'eau (IUPAC, 2004).

Détail inutile pour les citoyens formés aux sciences de la nature, mais indispensable à tous ceux qui n'ont pas suffisamment cette formation et qui participent à des débats publics : chacune des molécules d'eau est faite d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène, ce qui est noté conventionnellement H_2O (Lower, 2020). Et, pour terminer, l'espèce chimique nommée « eau » est un « composé », puisque ses molécules sont faites d'atomes de deux éléments chimiques différents : l'oxygène et l'hydrogène.

Ci-dessus nous avons fait l'hypothèse d'une pureté absolue des échantillons, en

considérant que l'eau était faite de molécules toutes identiques, mais on verra plus loin (exemple 5) que l'on a intérêt à distinguer cette eau pure (sans doute impossible à préparer en pratique), faite seulement de molécules d'eau, et l'eau que nous buvons, qui contient inévitablement nombre d'« impuretés », à savoir des molécules qui ne sont pas des molécules d'eau, ou bien des ions variés (sodium, magnésium, chlorure, nitrate, etc.).

Ce qui est dit de l'eau vaut évidemment pour les autres substances.

Quoi qu'il en soit, l'abus (ou impropiété, selon les cas) de langage qui consiste à parler de « molécule » pour évoquer une espèce chimique a des conséquences graves : l'auteur de ce texte peut témoigner avoir rencontré un journaliste scientifique d'une chaîne de télévision du service public qui pensait (et expliquait à son public !) qu'il y avait 450 molécules odorantes dans les vins, et cette personne pensait bien à 450 objets particuliers, à 450 molécules des chimistes, et pas à 450 composés odorants. Car oui, le vin contient quelques centaines de composés odorants différents (selon les vins), mais chacun de ces composés est présent, dans une bouteille de vin, à raison de centaines de milliers de milliards de molécules (Pons *et al.*, 2017).

La pratique des conférences de vulgarisation, ainsi que des interrogations de passants dans la rue, montrent que ce cas est très loin d'être isolé : quand la notion de molécules est déclarée connue, l'idée à laquelle elle correspond est très souvent erronée, sans même aller jusqu'à espérer que les citoyens sachent que les molécules sont en mouvement.

Ajoutons que les confusions entre « composés » et « molécules », quand ce ne sont pas des abus de langage, peuvent résulter tout autant de la connaissance insuffisante de la chimie, notamment de son vocabulaire, que de la difficulté de penser les catégories, déjà discutée par Aristote, puis

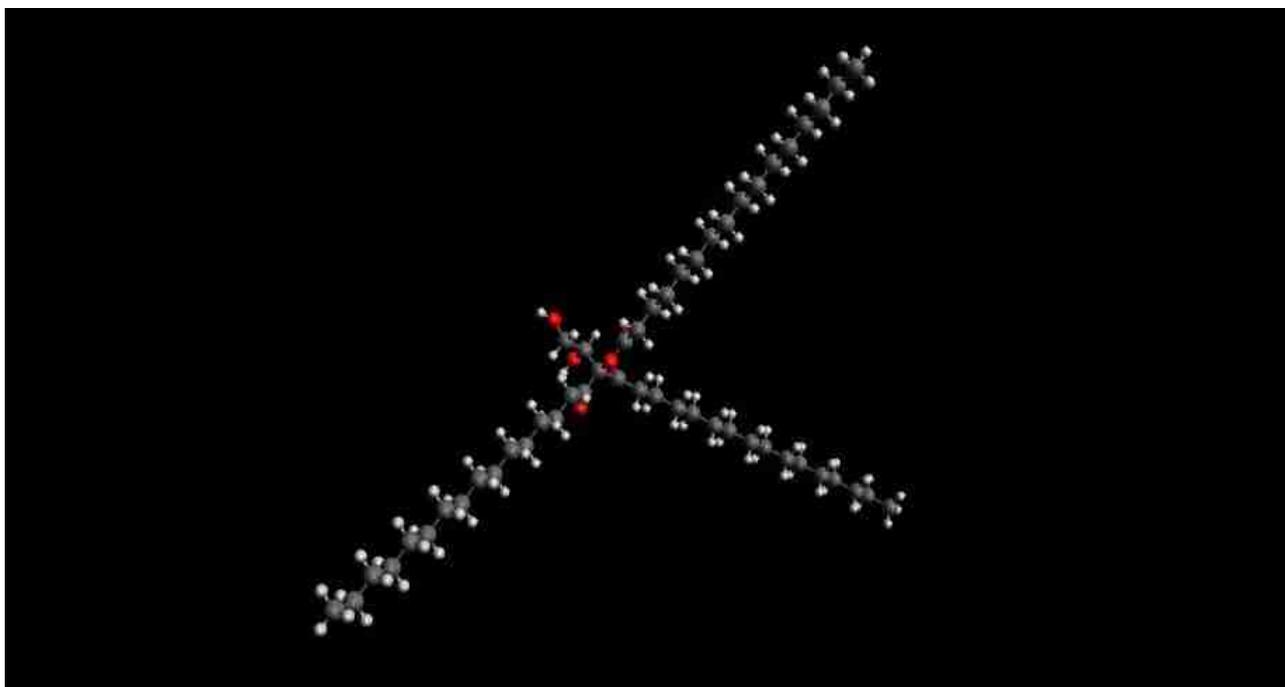


Figure 1. Une représentation d'une molécule d'un triglycéride particulier : le tripalmitoylglycérol. Dans cette représentation, les boules grises sombre représentent des atomes de carbone, les boules gris clair des atomes d'hydrogène, et le boules rouges des atomes d'oxygène (source H. This).

bien d'autres (Van Aubel, 1963), avant d'être, par exemple, un des écueils de l'enseignement, notamment celui des « mathématiques modernes » (Thom, 1970). C'est d'ailleurs une raison pour laquelle l'introduction de la notion moderne de molécules fut un acquis si remarquable de la chimie, dû notamment à Amedeo Avogadro (1776-1856), qu'elle resta l'objet de controverses scientifiques violentes jusque dans la première moitié du vingtième siècle : des chimistes français, notamment autour de Marcellin Berthelot, refusaient l'idée moderne (pourtant juste) de molécule, et leur influence politique, notamment en matière d'instruction et de formation universitaire, a fait prendre à la chimie française un demi-siècle de retard (Jacques, 1987). Bref il y a bien des raisons d'être vigilant à propos de ce mot « molécule », spécialement quand on s'adresse à des interlocuteurs ou à

un public qui ne sont pas au courant des possibilités de confusion.

2. De façon plus particulière, des abus de langage que je crois néfastes, en sciences, technologies et techniques des aliments, consistent à parler des « acides gras d'un triglycéride » ou des « acides aminés d'une protéine » : il est plus juste (et décidé internationalement) d'utiliser respectivement les terminologies « résidus d'acides gras » et « résidus d'acides aminés » pour les parties justement désignées ainsi, dans les triglycérides ou dans les protéines (IUPAC, 2019).

Pourquoi ? Parce que les acides gras, par exemple (on est parfois obligé d'ajouter l'adjectif « libres » pour se faire bien comprendre), sont des composés bien différents des triglycérides. Et, souvent, on ajoutera utilement qu'il n'y a quasiment pas

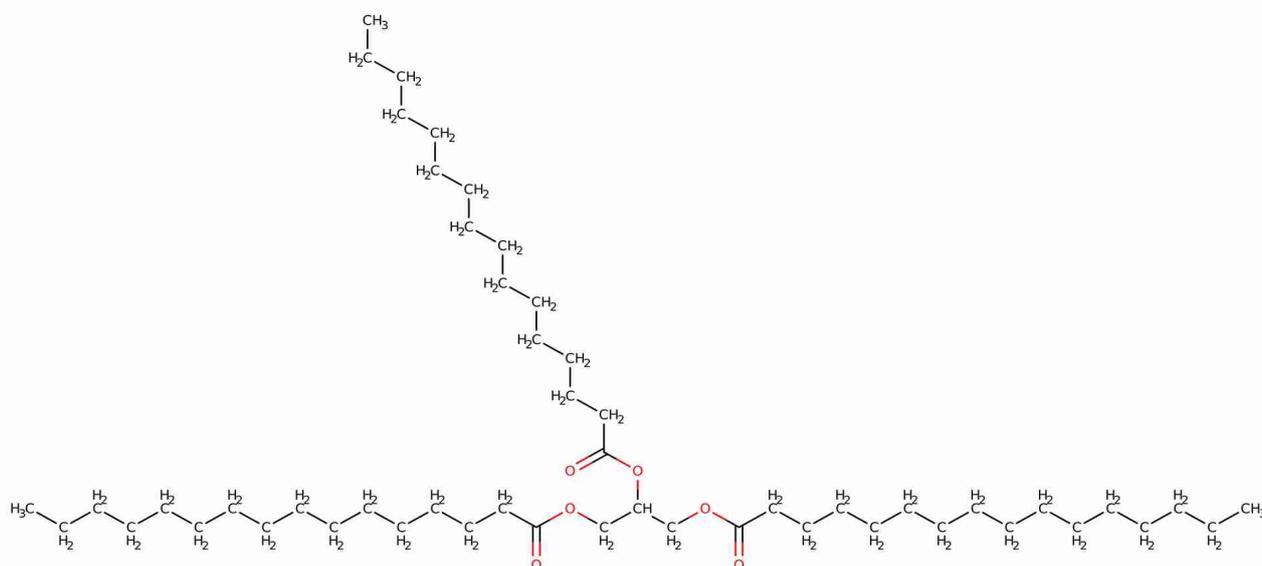


Figure 2. La formule entièrement développée du tripalmitoylglycérol : les lettres C, H, O représentent respectivement les atomes de carbone, d'hydrogène et d'oxygène ; certaines lettres C sont omises pour des raisons de clarté (source H. This).

d'acides gras (libres) dans les huiles ou dans les autres matières grasses alimentaires : ce fut, cette fois, un apport du chimiste français Michel-Eugène Chevreul (Angers, 1786 - Paris, 1889) que d'établir que les corps gras alimentaires sont majoritairement composés de « triglycérides », et non d'acides gras, reconnaissant par des mesures de grande précision que la réaction d'estérification par laquelle on peut éventuellement synthétiser un triglycéride ne correspond pas à une juxtaposition, mais à un réarrangement d'atomes qui change la nature des réactifs (Chevreul, 1823).

Pour les protéines, il fallut les avancées de Theodor Svedberg pour que l'on finisse par comprendre, dans les années 1920, la différence entre un polymère (ce que sont les protéines) et un assemblage colloïdal (d'acides aminés, en l'occurrence) (Florkin et Stotz, 1972).

L'expérience de l'enseignement universitaire montre combien la confusion entre acides gras et triglycérides, ou acides aminés et protéines, reste répandue jusqu'en maîtrise, et, de même, l'analyse des discussions

publiques montre combien les idées sont souvent confuses à ce propos.

Pour expliquer justement les choses à un public qui entend parler sans cesse « des acides gras des huiles de table », jusque dans des documents d'hygiène alimentaire (PNNS, 2020 ; Olivier *et al.*, 2014), on peut utilement commencer par indiquer que l'huile (comme d'ailleurs la plupart des corps gras alimentaires) est principalement faite de très nombreuses molécules analogues à des pieuvres à trois bras souples : ces molécules sont des molécules de « triglycérides ». Notons que l'on pourrait également dire « triacylglycérols », mais on augmenterait inutilement la complexité (Figures 1 et 2).

Les huiles, par exemple, contiennent d'autres composés que les triglycérides, mais ils sont très minoritaires. Par exemple, au milieu des molécules de triglycérides, les huiles contiennent aussi de rares molécules d'acides gras (libres, donc), des molécules de squalène, des molécules d'acides terpéniques, des molécules de stérols, etc., mais le total de toutes ces dernières,

Point de vue

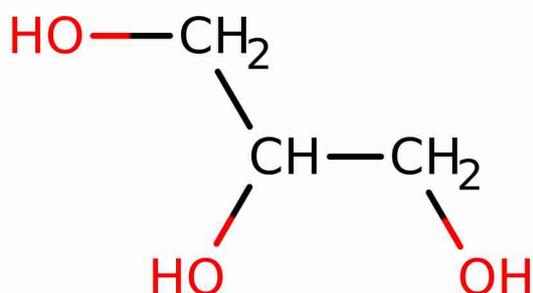


Figure 3. La molécule de glycérol est faite de trois atomes de carbone enchaînés, chaque atome de carbone étant lié à un atome d'oxygène, lié lui-même à un atome d'hydrogène, et à des atomes d'hydrogène en nombre suffisant (un ou deux) pour que chaque atome de carbone soit tétravalent, c'est-à-dire qu'il ait quatre liaisons chimiques avec des atomes voisins (source H. This).

constitutives de l'huile, ne fait que un pour cent en masse.

Concentrons-nous donc sur ces triglycérides qui sont très majoritaires. L'huile et les autres corps gras en contiennent de très nombreux différents (plusieurs milliards pour la matière grasse laitière), dont les noms sont fixés par les règles internationales de l'Union internationale de chimie (IUPAC, 2019) : les règles générales de dénomination chimique conduisent à reconnaître d'abord, au centre des molécules de triglycérides, un motif de trois atomes de carbone enchaînés, liés chacun à un atome d'oxygène, ce qui est également le cas dans les molécules du composé nommé glycérol (Figure 3). Pour autant, il n'y a pas de glycérol (ni le composé, ni la molécules) dans les molécules des triglycérides ; il n'y a qu'un groupe d'atomes qui fait penser au glycérol, d'ailleurs à trois atomes d'hydrogène près (ce qui n'est pas rien, en chimie), et c'est ainsi que l'on doit parler, pour cette partie identifiée par la pensée de « résidu de

glycérol » (IUPAC, 2019).

Partant de ce centre qu'est le résidu de glycérol, après les atomes d'oxygène qui ont été évoqués pour ce résidu, les molécules de triglycérides portent de longues chaînes d'atomes qui diffèrent peu de celles de molécules de composés qui seraient des acides gras : les molécules d'acides gras sont, en effet, des enchaînements d'atomes de carbone liés exclusivement à des atomes d'hydrogène, avec, à une extrémité, un groupe « acide carboxylique », l'atome de carbone terminal étant lié à un atome d'oxygène par une double liaison, et à un groupe hydroxyle, fait d'un atome d'oxygène lié lui-même à un atome d'hydrogène (Figure 4). Dans les triglycérides, cette structure n'est pas présente comme telle, mais seulement discernable à quelques atomes près. On ne fait que reconnaître, dans les molécules de triglycérides, un résidu de glycérol et trois « résidus d'acides gras ».

Pourquoi certains (chimistes ou non) hésiteraient-ils à dire les choses justement ? Pourquoi refuserait-on d'être terminologiquement rigoureux ? Parce que les triglycérides pourraient être assemblés à partir d'acides gras, et dégradés en acides gras ? En réalité, les triglycérides peuvent être constitués et modifiés de très nombreuses façons différentes, et pas nécessairement par assemblage d'une molécule de glycérol et de trois molécules d'acide gras. Cela dépend des conditions de réaction : réactifs présents, pH, présence de radicaux libres, de catalyseurs, etc.

Surtout parler abusivement des acides gras (au lieu de parler justement des « résidus d'acides gras ») dans les matières grasses, c'est s'exposer à ce que le public (et même des étudiants en science, en technologie et en technique des aliments) pense que l'huile est faite d'acides gras ! Le risque concerne même des personnes formées aux sciences : l'auteur de ce texte témoigne connaître un excellent physicien, directeur de

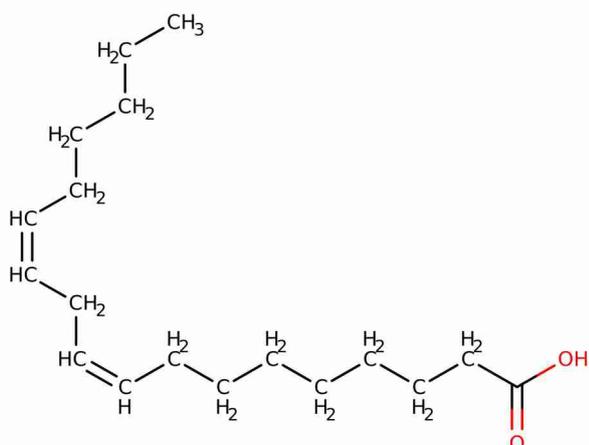


Figure 4. Une molécule d'un acide gras (l'acide linoléique). C'est une chaîne d'atomes de carbone liés à des atomes d'hydrogène, avec une extrémité qui porte un « groupe acide carboxylique » : le dernier atome de carbone est lié à un atome d'oxygène et à un groupe hydroxyle, fait d'un atome d'oxygène qui est lié à un atome d'hydrogène. Sur cet acide gras particulier, on observe deux « doubles liaisons » : c'est un acide gras « insaturé ». Quand on parle de « triglycéride insaturé », cela signifie qu'un résidu d'acides gras au moins porte une ou plusieurs insaturations (source H. This).

recherche éminent dans sa discipline, qui le croyait... parce que le langage ambiant confus le lui avait fait penser.

Un collègue nutritionniste qui parlait d'« acides gras des triglycérides » a été interrogé, lors de la préparation du présent article, et il a notamment invoqué (1) l'habitude et (2) le fait que le public pourrait craindre des « résidus »... La première raison n'est pas suffisante, comme l'a montré l'histoire de la chimie, qui a progressé avec la clarification terminologique, mais la seconde est discutable : n'y a-t-il pas un risque de paternalisme à croire que le public est incapable de bien penser (This et Panel, 2010), sachant par ailleurs combien les charlatans, malhonnêtes, idéologues se

faufilent dans la moindre brèche intellectuelle pour propager leurs idées pernicieuses ? De surcroît, si le mot -accepté internationalement- de « résidu » leur semble d'emploi difficile, pourquoi ne pas utiliser « fragment », ou « groupe », par exemple... sachant quand même que, en français, un résidu est une partie qui reste après qu'une partie principale a été retirée, par exemple par évaporation : la connotation n'est pas obligatoirement négative.

3. Un troisième exemple, à propos des « sels minéraux », veut montrer combien les abus de langage peuvent induire insidieusement des idées fausses, même dans le milieu scientifique. On commencera par observer que, très souvent, l'expression « les sels minéraux » devrait être remplacée par « les ions minéraux », ou « le contenu minéral de... ».

Commençons par observer que l'on entend et qu'on lit souvent que l'eau contient des « sels minéraux », ou, pire, que le « calcium » et d'autres ions minéraux seraient des sels minéraux (Passeport santé, 2020 ; Greenfield et Southgate, 2007)... Cela est impropre pour plusieurs raisons. Tout d'abord, le calcium est un « élément », et il n'est présent dans les aliments que sous la forme d'ions calcium divalents. D'autre part, un ion minéral, tel l'ion calcium, n'est pas un sel minéral, mais seulement un ion minéral, qui pourrait être constitutif d'un sel minéral s'il était dans un édifice cristallin, avec des ions de charge opposée (au moins en bilan). Car les « sels minéraux », enfin, sont (dans les conditions ambiantes) des solides cristallisés, tel le chlorure de sodium (dont notre sel de table est majoritairement constitué).

Si l'on place des cristaux d'un sel (par exemple, le chlorure de sodium) dans de l'eau, les ions constitutifs (chlorure et sodium) peuvent se disperser, s'entourant de molécules d'eau, et une solution de ce

sel peut se former (dans les limites de la solubilité). Dans ce cas particulier de la dissolution d'un sel unique, l'eau contient bien un sel minéral, en solution, dans la mesure où on l'y a mis.

Toutefois cela n'est plus vrai pour une eau potable ordinaire, qui contient des ions minéraux variés : sodium, potassium, magnésium, chlorures, nitrates, sulfates, phosphates... Ces eaux contiennent effectivement des ions minéraux, et elles ont donc un contenu minéral, mais contiennent-elles des sels minéraux ?

C'est à propos de la dernière question que la difficulté apparaît, comme on le voit sur le cas simple d'une solution aqueuse où l'on aurait initialement dissous deux sels minéraux, tels le chlorure de sodium et le nitrate de potassium, par exemple. Cette solution serait la même si l'on avait dissous plutôt du chlorure de potassium et du nitrate de sodium, de sorte que, sans savoir comment la solution a été constituée, il est impossible de dire quels sels minéraux elle peut contenir.

Plus généralement, face à une solution qui a un contenu minéral, il est impossible de dire quels « sels minéraux » elle contient. Ce qui vaut pour une solution aqueuse vaut pour les ingrédients alimentaires et les aliments, notamment les tissus végétaux ou animaux, ou les préparations culinaires qui en sont constitués : tous ont un contenu minéral, tous contiennent des ions minéraux, mais on serait bien en peine de désigner les sels minéraux qu'ils contiennent. Conclusion : les aliments ne contiennent pas de sels minéraux !

4. Le quatrième exemple concerne une particularité plus subtile - mais chimiquement essentielle - des composés des aliments : leur « chiralité ». Pour la discuter, évoquons d'abord un tragique épisode de la pharmacie.

Dans les années 1950 et 1960, le thalidomide a été prescrit aux femmes enceintes pour soulager leurs nausées matinales, mais on avait omis que le

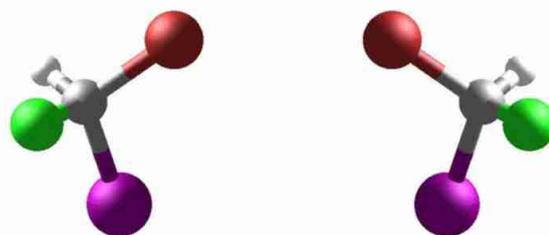


Figure 5. Une molécule qui est construite autour d'un atome de carbone ayant quatre substituants différents n'est pas superposable à son image dans un miroir (source H. This).

composé se présente sous deux formes images l'une de l'autre dans un miroir, comme une main gauche et une main droite. Or, de même qu'une main gauche n'est pas une main droite, une forme moléculaire gauche a des propriétés chimiques et biologiques différentes d'une forme moléculaire droite (Figure 5). Métaphoriquement on ne fait pas entrer la main gauche dans le gant droit ou *vice versa*, et ce qui vaut pour les mains et les gants vaut pour les principes actifs et les récepteurs biologiques (Jacques, 1981). En l'occurrence, pour le thalidomide, sa forme chirale « droite » soulage les nausées, tandis que sa forme « gauche » provoque des malformations chez le fœtus : 10 000 à 20 000 enfants sont nés ainsi, terriblement atteints, en raison de la confusion !

Avec les aliments, qu'ils s'agisse de nutriments ou de composés bio-actifs, la même question se pose, et c'est ainsi que la chiralité (la différence main gauche/main droite) est devenue l'outil quotidien des aromaticiens et des parfumeurs : par exemple, la (+)-(S)-carvone et la (-)-(R)-carvone n'ont pas la même odeur, de menthe verte ou d'aneth. Ou encore, la (E)-anéthole (forme *trans*) est très peu toxique, tandis que la forme *cis*, de synthèse ou naturelle en traces, l'est

Point de vue

beaucoup plus. Les deux énantiomères du linalol sont naturels, mais si le (+)-(S)-linalol de la coriandre est très peu toxique, le (-)-(R)-linalol du basilic et de la lavande l'est davantage. Parler simplement de « l'anéthole », par exemple, est simpliste... sans oublier les catastrophes que cela peut provoquer !

5. Des composés, passons maintenant à des « produits » utilisés dans l'alimentation. Pour les premiers, nous avons évoqué la difficulté courante à penser des catégories, mais nous ne sommes pas entrés dans les détails des difficultés philosophiques, à savoir notamment que « le cheval » est une catégorie très hétérogène : on range dans le même groupe les poneys, les percherons, les chevaux bai, gris, pie... Cette question se rencontre avec les ingrédients alimentaires.

Là encore, les débats publics sont hâtifs : « la » farine, par exemple... Laquelle ? De quel type ? Avec quelle composition ? Les boulangers et pâtisseries savent bien la variabilité de ce produit, même quand on ne considère que la farine de blé, au point que cela complique considérablement les recettes (Inbp, 1990) : la quantité d'eau qu'il faut ajouter à une pâte dépend de l'année, de la provenance, de la mouture, de la température d'utilisation... Ce même type d'observations vaut pour l'essentiel des ingrédients alimentaires : « la » gélatine, « la » lécithine, etc.

Ici pour des « produits » comme à propos de la chiralité des composés, la question est terminologique, et les conséquences sont parfois graves. On rappelle l'épisode terrible de 2019, quand un industriel de la pharmacie a changé la formulation de son médicament contre l'hypothyroïdie : le changement de formulation, qui ne s'était pas accompagné d'un changement de nom, eut de terribles conséquences pour nombre de patients qui utilisaient « le » produit (Ansm, 2017). Pour l'alimentation, cette question doit s'analyser à l'aune de la loi de 1905 sur le commerce des

produits alimentaires, qui doivent être « loyaux » (du cheval n'est pas du bœuf) : cette loyauté impose de justes désignations (Académie d'agriculture de France, 2011) et, notamment, de justes dénominations chimiques. D'où l'importance de l'IUPAC, évoquée précédemment.

Cette observation trouve toute son importance à propos des additifs alimentaires : il y a certainement lieu de mieux les désigner (Anses, 2016). Par exemple, l'additif désigné par le code européen E140 correspond à ce qui est nommé parfois chlorophylline, ou parfois chlorophylle (Efsa, 2015), mais, finalement, de quoi s'agit-il ?

Observons tout d'abord que « la » chlorophylle est une terminologie périmée, introduite en 1818 par les pharmaciens français Joseph Bienaimé Caventou (1795–1877) et Pierre Joseph Pelletier (1788–1842) pour désigner ce que les cuisiniers nommaient du « vert d'épinard » (This, 2019) ; aujourd'hui, on connaît « des » chlorophylles, avec des absorptions lumineuses différentes : *a*, *a'*, *b*, *b'*, *c*, *d*, *e*, etc. D'autre part, les préparations que l'on fait à partir de chlorophylles et de métaux, tels le zinc ou le cuivre, ne sont plus des chlorophylles (au centre desquelles il y a naturellement un ion magnésium divalent), mais des chlorophyllines, zinciques ou cuivriques, par exemple.

Nous retrouvons la même question à propos de « la » lécithine (IUPAC, 1979), un terme qui pâtit encore des hésitations de la chimie, quand celle-ci était jeune et plus imparfaite qu'aujourd'hui. Là, l'histoire commence en 1845, quand le chimiste et pharmacien français Théodore Gobley isole la « lécithine » du jaune d'œuf (*lekithos* signifie « jaune d'œuf », en grec) ; en 1874, il établit la formule chimique complète de la « lécithine phosphatidylcholine » (Gobley, 1874). Entre 1850 et 1874, il avait démontré la présence de « la lécithine » dans diverses matières biologiques, notamment le sang veineux, les poumons humains, la bile, le tissu cérébral

humain, les œufs de poisson et la cervelle de poulet et de mouton.

Comment admettre que, aujourd'hui, « la lécithine » désigne des préparations (des mélanges de composés, donc), aux propriétés différentes selon les producteurs ? Les différences de fonctionnalités des diverses préparations exposent les utilisateurs à des déboires. Bien sûr, on pourrait dire qu'aucune matière n'est constante : « la » gélatine peut avoir beaucoup ou peu de force gélifiante, selon les lots ; idem pour « la » pectine, dont il existe diverses variétés... voire pour la « poudre de blanc d'œuf », qui est vendue sous ce nom, qu'il s'agisse de blanc d'œuf cuit et déshydraté, ou de blanc d'œuf frais déshydraté, avec des différences de fonctionnalités considérables pour les deux produits (l'un ne coagule pas, et l'autre peut coaguler). N'aurions-nous pas intérêt, en vue d'un commerce loyal, à mieux désigner les ingrédients alimentaires qui font l'objet de commerce ?

6. La même question se retrouve avec les produits nommés – hélas- des « arômes » (Dgccrf, 2006), et pour lesquels je propose d'analyser que les flous terminologiques ont sapé la cohésion sociale. En effet, nous savons tous que, d'une part, ces produits sont largement utilisés par l'industrie alimentaire, et, d'autre part, ils sont largement critiqués - depuis longtemps - par une partie de la population (60 Millions de consommateurs, 2016). Ne pourrait-on interpréter que le public craint une tromperie ? De fait, l'industrie alimentaire et les instances réglementaires ont gauchi le mot « arôme », qui, en français, désigne l'odeur d'une plante aromatique, d'un aromate (TLFi, 2020). On aurait été plus avisé de ne pas utiliser ce terme pour désigner des compositions ou des extraits aromatisants !

Car c'est bien de cela dont il s'agit : ces compositions ou extraits (qui ne sont jamais « naturels », *stricto sensu*, puisqu'ils sont produits par des artisans ou des industriels) sont soit des « compositions », obtenues par mélange de composés odorants, par un

travail technique et artistique qui s'apparente à celui du parfumeur ; soit des « extraits », obtenus par des méthodes qui ressemblent à la production du sucre de table à partir de la betterave, ou à la production des eaux-de-vie à partir des vins, avec, dans ce cas, des procédés qui vont de la pression à froid à la distillation, éventuellement avec des solvants (Sniaa, 2020). Le public ayant raison de penser que les compositions ou extraits ne sont pas des « arômes », au sens de la langue commune, mais plutôt des aromatisants, l'industrie alimentaire, si elle veut montrer sa loyauté, et les instances réglementaires, si elles visent plus de cohésion sociale, n'auraient-elles pas intérêt à prendre la mesure de l'erreur initialement commise et à changer la terminologie ?

Ajoutons deux points : (1) la langue anglaise, elle, distingue le goût (*flavour*) des aromatisants (*flavourings*) ; (2) certains de ces aromatisants sont si remarquables, d'un point de vue olfactif, qu'il n'y a guère de raison de ne pas les mettre à disposition du public, pour qu'il les utilise dans sa cuisine quotidienne... à condition qu'il en ait une perception juste.

7. Nous avons ébauché, dans le paragraphe précédent, une discussion relative au terme « naturel », mais nous n'avons pas suffisamment insisté pour rappeler que la réglementation contredit également le dictionnaire quand elle accepte cet adjectif pour des produits, aromatisants (Sniaa, 2020) ou autres. Dans la mesure où le naturel exclut l'intervention d'un être humain (TLFi, 2020b), cet emploi du terme « naturel » est indu, voire malhonnête : les « produits » ont effectivement été produits, par des êtres humains, de sorte qu'ils sont *stricto sensu* « artificiels ».

Si l'on était trop laxiste, on irait jusqu'à la possibilité de parler d'« aliments naturels », et cela est bien impossible puisque nos aliments

sont cuisinés. Même les « crudités » font l'objet d'une préparation culinaire, avec parage, lavage, découpe, ajout d'une sauce, etc. (Bocuse, 1976). Donc non : il n'y a rien de naturel dans notre alimentation, et la réglementation devrait absolument refuser la tentation démagogique d'accepter ce terme de naturel à propos de produits alimentaires, car il y a à ce propos la source de conflits.

8. Terminons ce florilège avec les nitrates et les nitrites, dont on observera que bien peu de ceux qui en parlent en ont déjà vu (cela vaut d'ailleurs pour la plupart des composés ou produits évoqués dans ce texte). Pourtant il n'est pas difficile d'aller racler certains murs pour récupérer du salpêtre (Guyon, 2006) : c'est un nitrate, que l'on a ajouté jadis aux salaisons (Anonyme, 1826) et qui a évité des botulismes (Pascal, 2020) !

Alors même que les nitrates et nitrites sont dénoncés par certains (Assemblée nationale, 2020 ; Ligue contre le cancer, 2019), l'industrie alimentaire, qui est menacée dans ses pratiques, a appris à cuire les jambons dans des bouillons de légumes, où des nitrates naturellement présents (véritablement naturellement, cette fois) sont transformés en nitrites par fermentation (Ifip, 2020). De sorte que les jambons (par exemple) ainsi obtenus contiennent des nitrates et des nitrites comme des pièces où l'on aurait ajouté du sel nitrité, couramment utilisé par les charcutiers.

Autrement dit, l'interdiction des nitrates et nitrites dans les charcuteries conduit à proposer également l'interdiction de jambon cuit avec des légumes, ce qui serait quand même un comble, d'autant que les micro-organismes qui transforment les nitrates en nitrites sont... naturellement présents dans l'environnement !

Une rigueur excessive ?

Arrêtons là le florilège, car nous pourrions

emplir des volumes, et concentrons-nous sur la question initialement posée : est-ce une rigueur excessive, inutile, que de se préoccuper d'une terminologie exacte, quand on évoque des espèces chimiques dans les débats publics ou dans l'enseignement ? Perd-on du temps à réclamer une terminologie précise ? Faut-il vraiment s'astreindre à éviter les abus de langage, les imprécisions ? Et a-t-on raison d'ennuyer ses interlocuteurs en répétant de façon lancinante, voire importune, que les protéines ne sont pas « faites d'acides aminés », mais de « résidus d'acides aminés », par exemple ? Doit-on supporter de paraître pointilleux en recommandant à ses interlocuteurs de parler de D-glucose plutôt que de glucose (on n'oubliera pas le thalidomide) ? Doit-on accepter de parler de « fer », quand on sait que la biodisponibilité du fer ionique (et pas n'importe quel ion fer) est bien différente de celle du fer héminique du sang (dans le groupe hème de certaines protéines), au point que les médecins qui prescrivent « du fer » pour lutter contre des carences doivent ajouter la prescription d'acide ascorbique, pour augmenter cette absorption (Cismef, 2020).

Répondons d'abord à la question posée avec un argument d'autorité, en citant Antoine-Laurent de Lavoisier : *« C'est en m'occupant de ce travail, que j'ai mieux senti que je ne l'avois, encore fait jusqu'alors, l'évidence des principes qui ont été posés par l'Abbé de Condillac dans sa logique, & dans quelques autres de ses ouvrages. Il y établit que nous ne pensons qu'avec le secours des mots ; que les langues sont de véritables méthodes analytiques ; que l'algèbre la plus simple, la plus exacte & la mieux adaptée à son objet de toutes les manières de s'énoncer, est à-la-fois une langue & une méthode analytique ; enfin que l'art de raisonner se réduit à une langue bien faite. [...]*

L'impossibilité d'isoler la nomenclature de la science, et la science de la nomenclature, tient à ce que toute science physique est nécessairement fondée sur trois choses : la série des faits qui constituent la science, les idées qui les rappellent, les mots qui les expriment [...] Comme ce sont les mots qui conservent les idées, et qui les transmettent, il en résulte qu'on ne peut perfectionner les langues sans perfectionner la science, ni la science sans le langage » (Lavoisier, 1789).

On le voit, l'idée du génial créateur de la chimie moderne était claire... et qui d'entre nous oserait le contredire, sur un point de pensée ? Qui d'entre nous a tant fait pour la science qu'il puisse se sentir supérieur à Lavoisier ? Allons, un peu de modestie.

Puis posons à nos interlocuteurs la question : en quoi serait-on gêné d'utiliser des termes justes ? Après tout, un botaniste ne confond pas une carotte avec un navet, et un forestier ne confond pas un sapin avec un épicéa, et ceux qui ne sont ni botaniste ni forestier se conforment aux usages définis par ces professionnels, puisque revient à ces derniers la charge de faire initialement la différence. Pas d'inconvénient, finalement, sauf de devoir travailler afin d'éradiquer nos propres imprécisions... mais beaucoup d'avantages à la précision en chimie : qu'il s'agisse de fond ou de forme, l'objectif est d'éviter des discours creux, d'inviter à aller y voir de plus près, et d'éviter que des idéologues ne s'emparent de confusions pour arriver à leurs fins masquées et, parfois, nauséabondes.

Oui, la rigueur terminologique pour les termes chimiques, ainsi que la cohérence des unités de mesure (Lavoisier participa également à leur harmonisation et à la création du Système métrique), sont le socle sur lequel des décisions collectives saines peuvent être prises. C'est donc une condition de la démocratie.

Sans compter que l'examen des mots évite des peurs inutiles. Par exemple, il y a quelques années, une revue de

consommation titrait que des produits contenaient des « traces de résidus de pesticides potentiellement cancérigènes ». Le mot « potentiellement » doit déjà nous mettre sur la piste du doute salutaire, car potentiellement cancérigène ne signifie pas cancérigène. Et l'exposition au produit est essentielle, car sans exposition à un danger, il n'y a pas de risque (Pascal, 2020). Le mot « pesticide » ? Il y a des pesticides synthétisés, d'une part, mais il y a aussi des composés avec lesquels les végétaux se protègent naturellement (Ames *et al.*, 1990). Nous ne discuterons pas ici des mérites et des dangers relatifs des deux catégories, d'autant que l'on ferait mieux de considérer les divers « pesticides », naturels ou artificiels, un à un, mais insistons : une pomme, une carotte, une pomme de terre, se protègent contre les agresseurs par des composés naturels... que l'on synthétise parfois pour les utiliser comme pesticides.

Des résidus de ces pesticides ? Supposons qu'un pesticide soit cancérigène, et qu'il soit dégradé : rien ne prouve que ses « résidus » (on parlerait plus justement de produits de dégradation) le soient aussi, et, mieux, pourquoi des résidus de pesticides de synthèse ne pourraient-ils pas être bénéfiques ? Au fond, nous retrouvons ici la question des triglycérides... mais le mot « résidu » est utilisé dans une autre acception... très vague !

Enfin, la revue de consommation n'évoquait pas des pesticides ni des résidus de pesticides... mais des traces de résidus de pesticides ! Sachant que nos appareils d'analyse chimique détectent des composés à des quantités aussi faibles que 10^{-15} mol/L (Kawai *et al.*, 2020), il y a d'abord lieu de poser la question « combien ? », et de mettre les quantités en relation avec les valeurs toxicologiques (dose journalière admissible, par exemple).

Pour terminer, faisons une observation utile : souvent les erreurs que font les

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Point de vue

étudiants en science et technologie de l'aliment résultent d'une mauvaise utilisation des termes, d'un usage imprécis de mots qu'ils utilisent sans les comprendre suffisamment. Ce qui a comme corollaire que les vœux de bonne utilisation terminologique doivent s'accompagner d'efforts en matière d'instruction : la chimie doit être présentée dès l'école primaire. Après tout, est-il si difficile de penser que l'eau, par exemple, soit faite de très nombreux petits objets en mouvement (les molécules d'eau) ? Et puis, parler de ce que l'on ne connaît pas, utiliser des mots dont on ignore le sens, montrer son ignorance par des phrases idiotes... Quand même, on a sa dignité, non ?

Références

60 Millions de consommateurs. 2016. *Des aliments en trompe-l'œil*, <https://www.60millions-mag.com/2016/06/08/des-aliments-en-trompe-l-oeil-10478>, dernier accès 2021-01-15.

Académie d'agriculture de France. 2011. *Que sont les produits alimentaires sains, loyaux et marchands*, Séance publique du 27 avril 2011, <https://www.academie-agriculture.fr/actualites/academie/seance/academie/que-sont-les-produits-alimentaires-sains-loyaux-et-marchands>, dernier accès 2020-12-15.

Ames BN, Profet M, Schisky Gold L. 1990. Dietary pesticides (99.99% all natural), *Proceeding of the National Academy of Sciences of USA*, 87, 7777-7781.

Anonyme. 1826. *La charcuterie ou L'art de saler, fumer, apprêter et cuire toutes les parties différentes du cochon et du sanglier*. Editions Audor, Paris.

Anses. 2016. *Le point sur les additifs alimentaires*, <https://www.anses.fr/fr/content/le-point-sur-les-additifs-alimentaires>, dernier accès 2020-12-15.

Anses. 2020a. *Les microplastiques, un risque pour l'environnement et la santé*, <https://www.anses.fr/fr/content/les-microplastiques-un-risque-pour-l%E2%80%99environnement-et-la-sant%C3%A9>, dernier accès 2020-12-15.

Anses. 2020b. *Nanomatériaux dans l'alimentation : les recommandations de l'Anses pour améliorer leur identification et mieux évaluer les risques sanitaires pour les consommateurs*, 9 juin 2020, <https://www.anses.fr/fr/content/nanomat%C3%A9ri-aux-dans-l%E2%80%99alimentation-les-recommandations-de-l%E2%80%99anses-pour-am%C3%A9liorer-leur>, dernier accès 2020-12-15.

Ansm. 2017. *Levothyrox et médicaments à base de lévothyroxine*, [https://www.ansm.sante.fr/Dossiers/Levothyrox-et-medicaments-a-base-de-levothyroxine/A-quoi-servent-les-medicaments-contenant-de-la-levothyroxine/\(offset\)/0](https://www.ansm.sante.fr/Dossiers/Levothyrox-et-medicaments-a-base-de-levothyroxine/A-quoi-servent-les-medicaments-contenant-de-la-levothyroxine/(offset)/0), dernier accès 2020-12-15.

Assemblée nationale. 2020. *Les sels nitrités dans l'industrie agro-alimentaire*, <http://www2.assemblee-nationale.fr/15/commissions-permanentes/commission-des-affaires-economiques/missions-d-information/les-sels-nitrites-dans-l-industrie-agro-alimentaire>, dernier accès 2020-12-15.

Bocuse P. 1976. *La cuisine du marché*, Flammarion, Paris.

Bru M. 2020. *Organismes génétiquement modifiés : dans la tourmente des contradictions de la sécurité alimentaire*, <https://www.revueconflits.com/organismes-genetiquement-modifies-dans-la-tourmente-des-contradictions-de-la-securite-alimentaire/>, dernier accès 2020-12-15.

Cabioch J. 2020. TIMSS : Que retenir pour l'enseignement des sciences au collège ?, *Le café pédagogique*, <http://www.cafepedagogique.net/l'expresso/Pages/2020/12/08122020Article637430>

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Point de vue

[181218329432.aspx](https://www.n3af.fr/181218329432.aspx), dernier accès 2020-01-8.

Cérou M. 2020. Acrylamide : de nouveaux aliments sous surveillance, *Process alimentaire*, <https://www.processalimentaire.com/qualite/acrylamide-de-nouveaux-aliments-sous-surveillance>, dernier accès 2020-12-15.

Chevreul ME. 1823. *Recherches chimiques sur les corps gras d'origine animale*, Berger Levrault, Paris.

Cismef. 2020. *Acide ascorbique*, <http://www.chu-rouen.fr/page/acide-ascorbique>, dernier accès 2020-12-15.

Condorcet N. 1791. *Cinq mémoires sur l'instruction publique*. http://classiques.uqac.ca/classiques/condorcet/cinq_memoires_instruction/cinq_memoires.html, dernier accès 2021-01-13.

Dgccrf. 1976. *Les arômes alimentaires*, <https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/les-aromes-alimentaires>, dernier accès 2020-12-15.

Foodwatch. 2020. *Pesticides*, <https://www.foodwatch.org/fr/sinformer/nos-campagnes/alimentation-et-sante/pesticides/>, dernier accès 2020-12-15.

Efsa. 2015. *Scientific opinion on the re-evaluation of chlorophylls (E 140(i)) as food additives*, <https://www.efsa.europa.eu/fr/efsajournal/pub/4089>, dernier accès 2020-12-15.

Florkin M, Stotz EH. 1972. *A history of biochemistry*. In *Comprehensive biochemistry*, 30, 292.

Gobley T. 1874. Sur la lécithine et la cérébrine, *Journal de Pharmacie et de Chimie*, 20, 98-103, 161-166.

Greenfield H, Southgate DAT. 2007. *Données sur la composition des aliments*, Organisation des Nations Unies, FAO. <http://www.fao.org/3/a-y4705f.pdf>, dernier accès 2020-01-12.

Guyon E. 2006. *L'Ecole normale de l'an III : Leçons de physique, de chimie, d'histoire naturelle*.

Presses de l'Ecole normale supérieure, Paris.

Ifip. 2020. *Impact de sel nitrité ou de bouillon de nitrate fermenté, Gestion des qualités technologiques et sanitaire des produits*, fiche 41, https://ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/fiche_2017_041.pdf, dernier accès 2020-12-15.

Inbp. 1990. *Mon métier, boulanger*, Editions J. Lanore, Paris.

INSERM. 2020, *La consommation d'aliments moins bien classés au moyen du Nutri-Score associée à une mortalité accrue*, <https://presse.inserm.fr/la-consommation-daliments-moins-bien-classes-au-moyen-du-nutriscore-associee-a-une-mortalite-accrue/40805/>, dernier accès 2020-12-15.

IUPAC. 1978. The nomenclature of lipids (Recommendations 1976) IUPAC-IUB, Commission on Biochemical Nomenclature, *Biochemical Journal*, 171(1), 21-35.

IUPAC. 2004. *Formulae*, <https://old.iupac.org/reports/provisional/abstract04/RB-prs310804/Chap4-3.04.pdf>, dernier accès 2020-12-15.

IUPAC. 2019. *Glycerides*. In *Compendium of chemical terminology*, 2nd ed. (The Gold Book), <https://goldbook.iupac.org/terms/view/G02647>, dernier accès 2020-12-15.

Jacques J. 1981. *Confessions d'un chimiste ordinaire*, Le Seuil, Paris.

Jacques J. 1987. *Berthelot : autopsie d'un mythe*, Belin, Paris.

Kawai Y, Miyake Y, Hondo T, Lehmann JL, Terada K, Toyoda M. 2020. New Method for Improving LC/Time-of-Flight Mass Spectrometry Detection Limits Using Simultaneous Ion Counting and Waveform Averaging, *Analytical Chemistry*, 92, 9, 6579–6586.

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Point de vue

Kressmann G. 2018. Risques réels et craintes infondées. *Paysans & société*, 368(2), 44-48.

Lacamp I. 2020. Les compléments alimentaires contenant du curcuma ou de la vinpocétine pourraient être dangereux, *Sciences et avenir*, https://www.sciencesetavenir.fr/sante/les-complements-alimentaires-contenant-du-curcuma-ou-de-la-vinpocetine-pourraient-etre-dangereux__141717 dernier accès 2020-12-15.

Lavoisier AL. 1789. *Traité élémentaire de chimie*, Cuchet, Paris.

Lide DR. 2005. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, Internet Version 2005, CRC Press, Boca Raton, Florida, <http://www.hbcpnetbase.com>, dernier accès 2020-12-15.

Ligue contre le cancer. 2019. *Stop aux nitrites ajoutés*, https://www.ligue-cancer.net/article/54352_stop-aux-nitrites-ajoutes, dernier accès 2020-12-15.

Lower S. 2020. *All about water*, Chemistry Libretexts, [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Physical_Properties_of_Matter/All_About_Water](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Physical_Properties_of_Matter/All_About_Water), dernier accès 2020-12-15.

Mary H. 2020. *Traçabilité, additifs... 60 Millions de consommateurs s'attaquent aux produits alimentaires ultra-transformés*, <https://www.usine-nouvelle.com/article/tracabilite-additifs-60-millions-de-consommateurs-s-attaquent-aux-produits-alimentaires-ultra-transformes>. N976911, dernier accès 2020-12-15.

Mills JS. 1874. *La nature*, Editions La Découverte (réédition 2003), Paris.

Myers RJ. 2012. What are elements and compounds, *Journal of chemical education*, 89(7), 822-833.

Naji JE. 2006. *Citoyens et media: guide pratique pour un dialogue entre citoyens et media*, www.UNESCO.org, CI/COM/VG/2006/RP/3, dernier accès 2020-12-15.

Ollivier D, Pinatel C, Ollivier V, Artaud J. 2014, Composition en acides gras et en triglycérides d'huiles d'olive vierges de 34 variétés et 8 Appellations d'Origine françaises et de 2 variétés étrangères implantées en France : constitution d'une banque de données, *Olivae*, 119, 36-48.

OPECEST. 2020. *Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques*, <http://www.senat.fr/opecest/>, dernier accès 2020-12-15.

Pascal G, 2020. *Rapport du groupe de travail « Impacts sur les cancers colorectaux de l'apport d'additifs nitrés (nitrates, nitrites, sel nitrité) dans les charcuteries »*, Académie d'agriculture de France, <https://www.academie-agriculture.fr/publications/publications-academie/avis/rapport-impacts-sur-les-cancers-colorectaux-de-lapport>, dernier accès 2020-12-15.

Passeport santé. 2020. *Les sels minéraux : tous sur ces micro nutriments indispensables*, esNutriments/Fiche.aspx?doc=sels-mineraux_nu, dernier accès 2020-12-15.

PNNS. 2020. *Manger bouger : les huiles riches en acides gras polyinsaturés*, <https://www.mangerbouger.fr/pro/sante/alimentation-19/nouvelles-recommandations-adultes/rubrique-test-e-les-huiles-riches-en-acides-gras-poly-insatures.html>, dernier accès 2020-12-15.

Pons A, Allamy L, Schüttler A, Rauhut D, Thibon C, Darriet P. 2017. What is the expected impact of climate change on wine aroma compounds and their precursors in grape?, *OENOOne*, Institut des Sciences de la Vigne et du Vin, 51 (2-3), 141-146.

Pouliquen F. 2020. *Charcuterie : La ligue contre le cancer, Yuka et Foodwatch demandent*

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Point de vue

l'interdiction des nitrites, 20 Minutes, 4 février 2020, <https://www.20minutes.fr/sante/2710507-20200204-charcuterie-ligue-contre-cancer-yuka-foodwatch-demandent-interdiction-nitrites>, dernier accès 2020-12-15.

Santé Magazine. 2020. L'alimentation est bien un facteur de risque pour le cancer de la prostate, *Santé Magazine*, 29 juillet 2020, <https://www.santemagazine.fr/actualites/actualites-alimentation/lalimentation-est-bien-un-facteur-de-risque-pour-le-cancer-de-la-prostate-650766>, dernier accès 2020-12-15.

Sniaa. 2020. *Définition*. <http://www.sniaa.Org/arome#definition>, dernier accès 2020-12-15.

This P, Panel P. 2010. La décision médicale partagée en gynécologie, *Gynécologie Obstétrique & Fertilité*, 38, 126-134.

Thom R. 1970. *Les mathématiques « modernes », une erreur pédagogique et philosophique ?*, L'Age de la science. <http://gaogoa.free.fr/HTML/Textes/Les%20Mathematiques%20Modernes%20par%20R.THOM.pdf>, dernier accès 2021-01-13.

TLFi. 2020a. *Arôme*, <http://stella.atilf.fr/Dendien/scripts/tlfiv5/advanced.exe?8;s=1754745780>, dernier accès 2020-12-15.

TLFi. 2020b. *Naturel*, <http://stella.atilf.fr/Dendien/scripts/tlfiv5/visusel.exe?14;s=1387088820;r=1;nat=;sol=9>, dernier accès 2020-12-15.

This H. 2019. *Parlons des chlorophylles, et pas de la chlorophylle !*, Encyclopédie, « Questions sur », Académie d'agriculture de France, https://www.academie-agriculture.fr/sites/default/files/publications/encyclopedie/final_s8-07_parlons_des_chlorophylles.pdf, dernier accès 2020-12-15.

Van Aubel M. 1963. Accident, catégories et prédicables dans l'œuvre d'Aristote, *Revue Philosophique de Louvain*. Troisième série, 61(71), 361-401.

Vaulpré J, Jaffé J. 2020. *Réformer dans un climat irrationnel, le nouveau défi des politiques*, <https://www.lesechos.fr/idees-debats/cercle/reformer-dans-un-climat-irrationnel-le-nouveau-defi-des-politiques-1161763>, dernier accès 2020-12-15.

Edité par

Nicole Moreau, Membre de la Société chimique de France et ancien Président de l'IUPAC. Président du Comité scientifique du Programme International pour les Sciences fondamentales (PISF) de l'UNESCO.

Rapporteurs

Nicole Moreau, Membre de la Société chimique de France et ancien Président de l'IUPAC. Président du Comité scientifique du Programme International pour les Sciences fondamentales (PISF) de l'UNESCO.

Jean-Pierre Foulon, ancien professeur de chimie en Spéciales au Lycée Henri IV à Paris. Membre du Comité de rédaction de l'Actualité Chimique (SCF).

Rubrique

Cet article a été publié dans la rubrique « Opinions » des *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France*.

Reçu

17 novembre 2019

Accepté

3 janvier 2021

Publié

13 janvier 2021

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Point de vue

Citation

This H. 2021. La rigueur terminologique pour les concepts de la chimie : une base pour des choix de société rationnels, *Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF)*, 11(1), 1-17.
<https://doi.org/10.58630/pubac.not.a43610>.



Hervé This est physico-chimiste dans l'UMR 0782 SayFood Inrae - AgroParisTech, directeur de l'Inrae-AgroParisTech International Centre for Molecular and Physical Gastronomy, professeur consultant à AgroParisTech, membre de l'*Académie d'agriculture de France*, membre correspondant de l'*Académie royale des sciences, arts et lettres de Belgique* et de l'*Académie de Stanislas*, membre de l'*Académie d'Alsace, sciences, lettres et arts*.

Un bon croquis vaut mieux qu'un long discours ?

**Judith Juvin, Marie-Charlotte Belhomme, Stéphanie Castex,
Christophe Bliard et Arnaud Haudrechy**

*Institut de Chimie Moléculaire de Reims, UMR 7312, SFR Condorcet FR CNRS 3417,
F-51097 REIMS Cedex, France*

Équipe Biomolécules, Synthèse et Mécanismes d'Action
arnaud.haudrechy@univ-reims.fr

Résumé

En disant « Un bon croquis vaut mieux qu'un long discours », Napoléon Bonaparte, pourtant promoteur de la production de sucre de betterave, n'imaginait sans doute pas contribuer au débat sur la représentation stéréochimique des sucres. Dessiner la structure d'une molécule de sucre (en anglais, la terminologie anachronique « hydrate de carbone » subsiste parfois) impose de transcrire, le plus fidèlement possible et sans ambiguïté, une correspondance entre une réalité tridimensionnelle et une représentation bidimensionnelle. Depuis les propositions initiales d'Emil Fischer, plusieurs méthodes ont été présentées. Cet article vise à faire prendre conscience de la subtilité des représentations isomériques des molécules de sucres.

Abstract

Napoleon Bonaparte once said, "A good sketch is better than a long speech". Though an ardent promoter of beet sugar production, Napoleon could never have imagined that he was describing the thorny problem of the stereo-

chemical representation of sugars. Drawing the structure of a sugar molecule (also called "carbohydrate") means addressing the challenge of unambiguously transcribing a three-dimensional reality into a bi-dimensional representation as accurately as possible. Since Emil Fischer's initial proposals, several methods have been suggested, with their advantages and drawbacks. Consequently, selecting a particular approach is far from inconsequential and involves numerous pitfalls. The objective of this document is to raise awareness of the subtleties of sugar molecules representations.

Mots clés

sucres, dessins, tridimensionnel

Keywords

sugars, drawings, tridimensional

Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
 (N3AF)
Document d'enseignement

À la fin du XIX^e siècle, Hermann Emil Fischer (Fischer, 1891) propose une méthode de représentation des sucres (Figure 1), bien avant les représentations initialement utilisées par Richard Kuhn (Kuhn, 1932), adoptées par Giulio Natta (Natta, 1955), puis popularisées par Donald J. Cram et George S. Hammond (Cram, 1959).

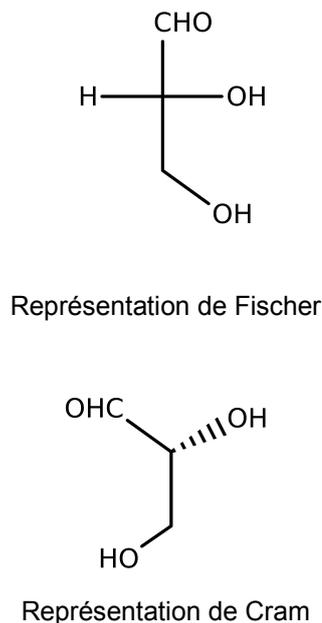


Figure 1. Représentations de Fischer et de Cram pour le D-glycéraldéhyde.

Très appréciée des biochimistes, la projection de Fischer représentée sur la figure 2a obéit à des règles de positionnement des groupes substituants. La convention de dessin explicitée sur la figure 2b impose que la fonction la plus oxydée soit en position apicale et en arrière du plan, et que les substituants qui décorent les carbones asymétriques de la chaîne soient en position horizontale et en avant du plan, la chaîne la plus longue étant disposée verticalement.

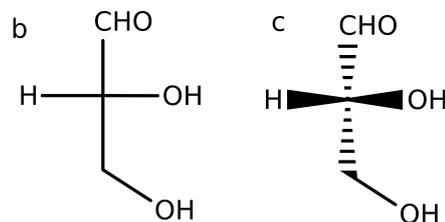
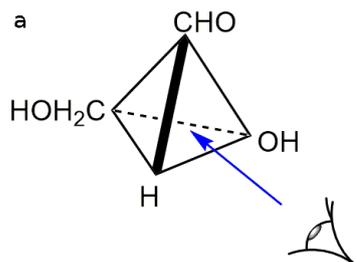


Figure 2. Correspondance entre le dessin tridimensionnel et la représentation de Fischer.

Utile pour comprendre la dichotomie itérative bien connue dans la chimie des sucres (si n est le nombre de centres asymétriques, alors il existe au maximum 2^n stéréoisomères possibles), la convention de Fischer impose les dessins de haut en bas, comme par exemple dans le cas du D-glucose (Figure 3).

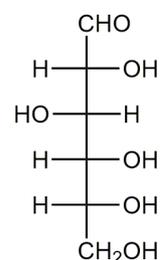


Figure 3. Représentation de Fischer du D-glucose, imposée de haut en bas.

Pour gagner de la place, il serait tentant de basculer la structure de 90°, mais la convention de dessin de Fischer révèle une première surprise : cette simple rotation aboutit en fait à l'énantiomère (Figure 4) !

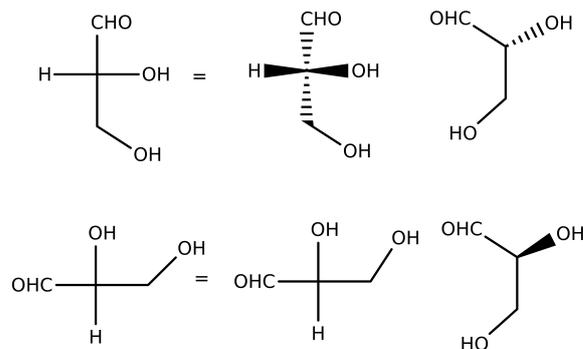


Figure 4. Conséquence d'une rotation de 90°, une source d'erreur dans le dessin.

Afin d'éviter cette première difficulté, il est sans doute plus aisé d'adopter une projection de Natta (Natta, 1955), telle que dessinée sur la figure 5.

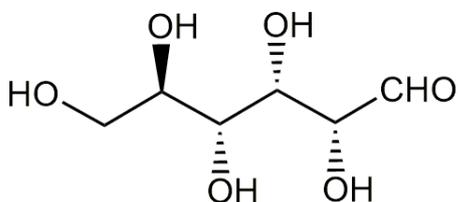


Figure 5. Projection de Natta du D-glucose, une structure en zig-zag.

Au-delà de ces considérations, la représentation de Fischer est bien adaptée aux structures ouvertes, alors qu'un sucre existe en solution sous différentes formes en équilibre, la plupart cycliques (majoritairement sous forme de cycles hexagonaux, nommés pyranoses, mais également sous forme de cycles pentagonaux, nommés furanoses).

Respectueux des projections de Fischer, certains n'hésitent pas à courber des liaisons, dans leurs représentations de molécules, pour les adapter aux formes cycliques, sacrifiant ainsi la rigueur à l'esthétique (Figure 6).

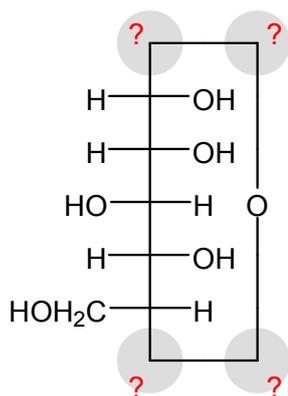


Figure 6. Dans une projection de Fischer d'une forme cyclique du D-glucose, l'introduction de sommets (ronds gris ; qui correspondent conventionnellement à la présence d'atomes de carbone) engendre des ambiguïtés.

Comment expliquer alors que toute rupture angulaire (symbolisée par des cercles gris sur les figures) correspond à un atome de carbone et que lorsqu'aucune précision n'est donnée sur les

substituants, il faut compléter avec des atomes d'hydrogène, sans laisser penser que la structure de la figure 6 correspond à celle de la figure 7 ?

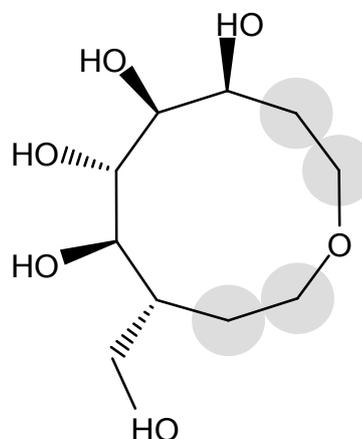


Figure 7. Avec la représentation de la figure 6, un risque de confusion avec cet analogue supérieur du D-glucose apparaît.

Bien évidemment, les initiés ne s'y trompent pas et savent que ces atomes de carbone n'existent pas. Mais alors, à quel moment peut-on décider si une structure est erronée ? Vouloir à tout prix dessiner selon une projection de Fischer aboutit notamment au dessin suivant (Figure 8).

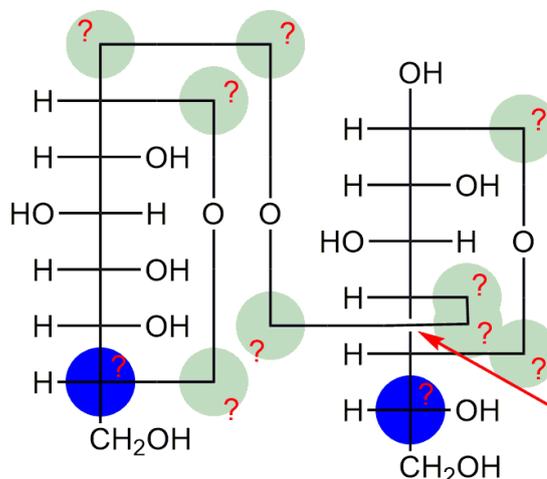


Figure 8. Cette projection de Fischer pour une forme cyclique d'un diholoside (le 4-O- α -D-glucopyranosyl-D-glucose) engendre de nombreuses sources d'erreurs (marquées par des ronds gris et la flèche rouge).

Au-delà de son analogie avec le problème évoqué précédemment, cette représentation comporte des erreurs dans le décompte des atomes de carbone (atomes de carbone excédentaires, symbolisés par des cercles bleus) et un enjambement de la liaison indiquée par la flèche rouge qui pourrait faire penser à une rupture de la chaîne carbonée.

Inspirées de celle de Fischer, certaines représentations, telles que celle de Rosanoff (Rosanoff, 1906), où les motifs hydroxyles sont supprimés et où la fonction aldéhyde est remplacée par un disque noir, sont parfois adoptées, pour gagner du temps à l'écriture (Figure 9). Cependant elles sont réservées à un public averti et ne manqueront certainement pas d'être mal interprétées par les non-initiés.

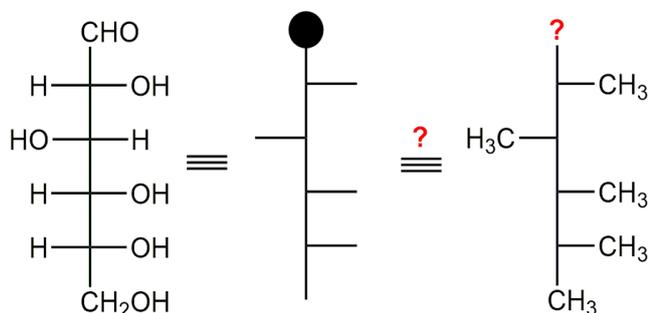


Figure 9. Projection de Fischer pour le D-glucose et notation de Rosanoff.

Afin de se rapprocher de la réalité tridimensionnelle, Walter Norman Haworth a proposé une méthode de dessin (Drew, 1926), très vite adoptée par la communauté scientifique, qui montre en perspective l'hétérocycle sous la forme soit d'un hexagone, soit d'un pentagone (Figure 10).

Cette méthode indique clairement les positions relatives des substituants par rapport au plan moyen du cycle (par exemple, dans la forme pyranose, C2-H et C4-H sont du même côté du plan, alors que, dans la forme furanose, ils sont de part et d'autre du plan) et permet de prédire divers comportements physico-chimiques (données RMN, notamment).

À noter que Haworth dessine certaines liaisons en gras afin d'aider le lecteur à orienter la molécule dans l'espace, grâce à cette représentation en perspective plongeante.

Cependant ceux qui souhaitent conserver une idée de l'angle idéal du tétraèdre ($109^{\circ} 28'$),

habituellement rencontré dans les liaisons du carbone tétrasubstitué, objectent que ce dessin reflète peu la forme réelle du cycle.

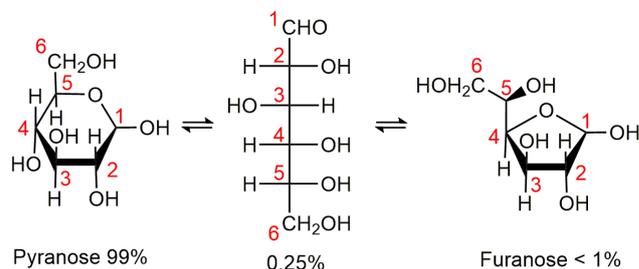


Figure 10. Projections de Haworth pour les formes cycliques du D-glucose : équilibre et proportions entre les différentes formes à 20°C .

Trois ans plus tard (Drew, 1926 ; Haworth, 1929), utilisant des modèles moléculaires solides comportant des atomes de carbone de géométrie tétraédrique, Haworth complètera cette méthode en proposant une représentation sous forme de conformères « chaise » (qui ressemble plutôt à un « transat »), permettant ainsi de positionner les liaisons des différents substituants des atomes de carbone de cycles hexopyranoses, avec des angles se rapprochant plus du tétraèdre parfait.

Quelques dessins hybrides apparaissent alors dans les publications : le premier (a), qui omet (ou sous-entend) les configurations, et le deuxième (b), sur lequel le centre asymétrique de la position C5 est mal dessiné et par voie de conséquence indéterminé (Figure 11).

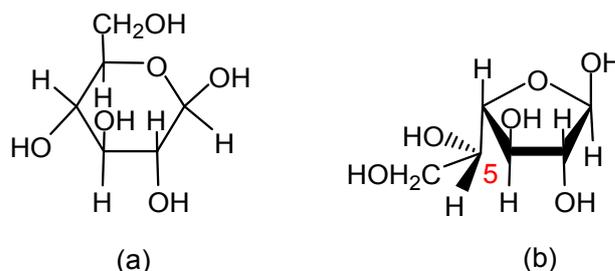


Figure 11. Quelques structures ambiguës, avec distorsion d'angles.

Néanmoins, la représentation de Haworth présentant de nombreux avantages, les spécialistes des sucres ont étendu celle-ci au domaine des di-, des tri- et des osides et se sont heurtés à la difficulté des atomes de carbone symboliques (Figure 12), déjà rencontrée (Figures 6 et 8).

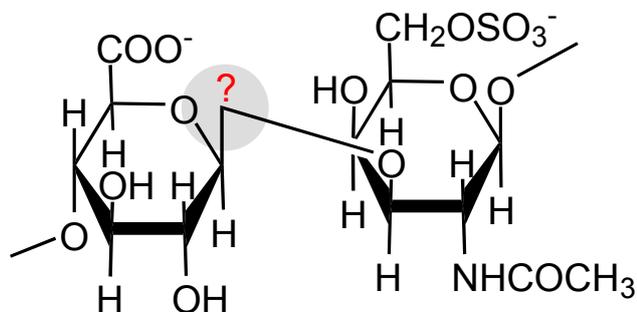


Figure 12. Projection de Haworth avec un atome de carbone excédentaire. Le sommet marqué d'un rond gris est ambigu : on se demande si c'est un atome de carbone ou un artefact de dessin.

Pour éviter ce type de dessins, de surprenantes liaisons courbes, tout aussi dénuées de sens, sont apparues, et sont encore rencontrées dans de nombreux documents (Figure 13).

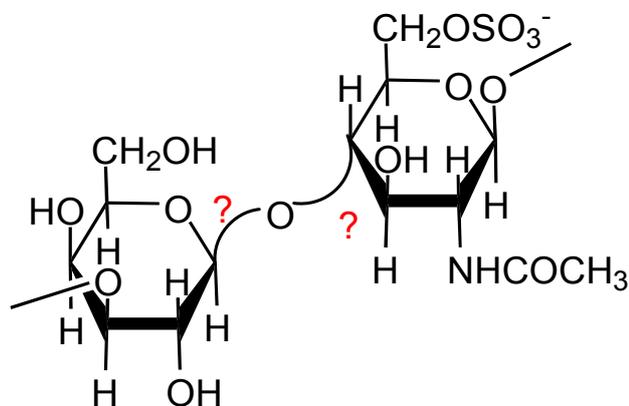


Figure 13. La « liaison courbe » ou la stratégie de l'évitement du piège.

À la lumière de ces nombreuses manières de dessiner un sucre, soit ambiguës soit erronées,

quelle serait la meilleure représentation, non fautive cette fois-ci, pour rendre compte d'une situation souvent complexe, nécessitant de décrire l'équilibre entre plusieurs formes ?

Finalement, pourquoi ne pas transcrire les structures réelles de ces sucres, en respectant tous les angles et les longueurs de liaisons ? Est-ce par souci de simplification et de rapidité que beaucoup d'entre nous dessinent les sucres de manière peu objective, en anticipant le fait que tout scientifique comprend et accepte ces représentations ?

Les auteurs ne doivent pas négliger les limitations des représentations et auront à assumer leurs décisions graphiques. La simplification pourrait induire une mauvaise compréhension et influencer les lecteurs.

Cependant, avant de retranscrire la structure d'un sucre, encore faut-il connaître l'ensemble des conformations en équilibre (liaisons en avant ou en arrière, angles de liaisons), ce qui est déterminé grâce à des études. Alors, le dessin est plus aisément justifié. Par exemple, si un composé est dessiné sous une forme chaise, alors ce composé doit majoritairement exister sous cette forme chaise. Dans le cas contraire, le dessin peut induire le lecteur en erreur, surtout si sa préoccupation première est de définir la forme d'une molécule. Et même si l'auteur connaît la signification de son dessin, il ne peut pas anticiper que le lecteur possède le même niveau de connaissances que lui. Dans le cas *a priori* le moins discutable, celui de l' α -D-glucopyranose, une forme « chaise » dite 4C_1 paraît la plus judicieuse (Figure 14).

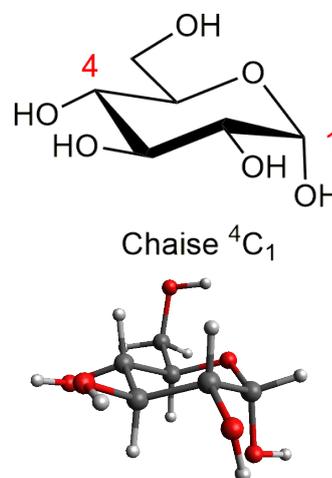


Figure 14. α -D-Glucopyranose sous forme chaise.

Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Document d'enseignement

Le fait que le maximum de groupes occupant les positions équatoriales sur une chaise est un facteur stérique favorable ne contrebalance pas le cas du centre anomérique qui aurait tendance à favoriser un hétéroatome porteur d'au moins un doublet non liant en position axiale (effet anomère), en vertu de considérations stéréoelectroniques bien documentées (Deslonchamps, 1983).

Cette représentation « chaise » possède l'avantage de visualiser immédiatement des relations stéréochimiques, telles que les relations trans-diaxiales versus diéquatoriales de deux atomes d'hydrogène portés par des atomes de carbone voisins, ce qui se traduit, par exemple en spectroscopie de résonance magnétique nucléaire (RMN), par des constantes de couplage 3J H-H significativement différentes (jusqu'à 16 Hz parfois pour des couplages transdiaxiaux, contre 1 ou 2 Hz pour des couplages transdiéquatoriaux).

Cependant on ne doit pas oublier que la variation d'enthalpie libre standard de Gibbs d'interconversion axiale/équatoriale des groupes hydroxyle est relativement faible (comprise entre 2,2 et 3,6 kJ/mol, selon la nature des solvants et des substituants voisins) et que ce raisonnement repose prioritairement sur le positionnement équatorial du CH₂OH (environ 7,5 kJ/mol) (Eliel, 1994).

Le cas des pentopyranoses vient corroborer cette influence, car l'absence du CH₂OH en C5 induit une interconversion facile des conformères ⁴C₁ et ¹C₄ (Figure 15), l'analyse RMN révélant l'existence des deux conformations (a) et (b) en proportions 1:1 (David, 1995).

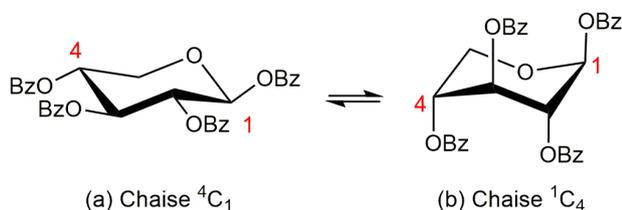


Figure 15. *α*-D-perbenzoylxylopyranose en équilibre à 20 °C.

Mais alors, que penser de l'exemple suivant (Bols, 2017), dérivé du D-glucopyranose portant plusieurs groupes très encombrants, et qui existe à 20 °C sous la forme d'une chaise inversée dite ¹C₄ (Figure 16) ?

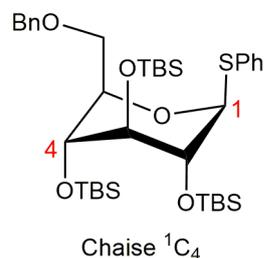


Figure 16. Une inversion ⁴C₁ vers ¹C₄ due à l'interaction stérique entre les substituants tertibutyldiméthylsilyloxy (OTBS) et phénylthio (SPh).

Ce comportement s'interprète par le fait que les groupes avec un fort encombrement stérique acceptent d'occuper les positions axiales afin d'éviter de se gêner.

Survient alors la question suivante : à partir de quel moment l'occupation de positions par des groupes encombrants compense-t-elle la préférence pour la position équatoriale ? Les diverses formes que peut adopter un motif « pyranose » modifié coexistent dans un équilibre « thermodynamique » et permettent certainement des compromis entre les phénomènes favorables et défavorables (effet anomère versus encombrement stérique par exemple, Figure 17).

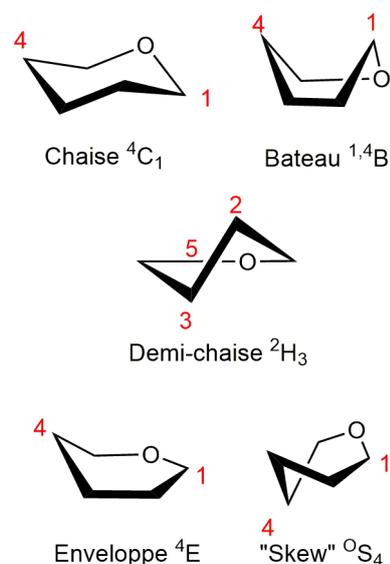


Figure 17. Exemples de conformations d'un pyranose.

Partant de ce principe, l'étude « pas à pas » d'autres possibilités configurationnelles (dit autrement d'autres sucres) mérite attention.

L' α -D-mannopyranose, pour lequel la position C2 est inversée par rapport au D-glucopyranose (Figure 18, série D-manno) devrait donc, selon toute vraisemblance, exister sous forme chaise 4C_1 . Cependant l'orientation axiale défavorable du groupe hydroxyle en position C2 pourrait privilégier des conformations plus atypiques et inattendues (Figure 18).

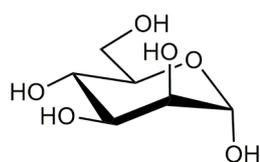


Figure 18. α -D-Mannopyranose sous forme chaise.

Suivant cette logique, l'étude des séries D-altrose et D-idose (Figures 19a et 19b respectivement) conduit à se poser la question de la pertinence des représentations des formes chaises 4C_1 .

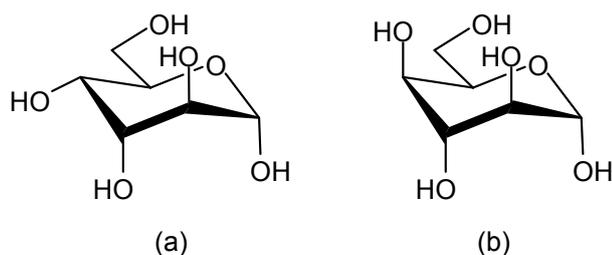


Figure 19. α -D-altropyranose et α -D-idopyranose sous forme chaise.

Conclusion

Chaque cas est, par essence, particulier et mériterait une étude conformationnelle approfondie pour choisir un dessin le plus représentatif de la réalité tridimensionnelle. Nous proposons, plutôt que d'écrire des aberrations, de préférer l'adoption systématique de la représentation de Cram, selon une vue en projection des cycles avec les substituants notés en « avant » et en « arrière » du plan. En effet, même si cette représentation n'est pas parfaite (puisque les liaisons intracycliques C-C

n'ont pas la même longueur que les liaisons C-O), elle permet d'affirmer indiscutablement que la description de Mills suivante (Mills, 1955) ne souffre d'aucune ambiguïté, quelle(s) que soi(en)t la (ou les) conformation(s) spatiale(s) dans laquelle (lesquelles) peuvent se trouver les différents cycles des sucres (Figure 20).

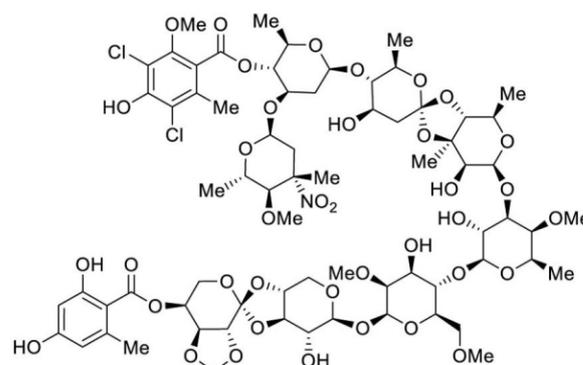


Figure 20. Représentation de Cram pour l'éverninomicine, un oligosaccharide antimicrobien aux configurations non classiques.

Sage décision, considérant que chaque sucre de l'éverninomicine pris indépendamment présente des configurations non classiques et, par voie de conséquence, mériterait une étude approfondie plus sérieuse.

En résumé, pour éviter tout doute, nous suggérons de ne rendre compte que de l'enchaînement des atomes, précisant les aspects configurationnels, en évitant les aspects conformationnels !

Références

- Bols M, Pedersen CM. 2017. Silyl-protective groups influencing the reactivity and selectivity in glycosylations, *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, 13, 93-105. DOI: 10.3762/bjoc.13.12.
- Cram DJ, Hammond GS. 1959. *Organic Chemistry*, Editions McGraw-Hill, New York. DOI: 10.1002/ange.19610730913.
- David S. 1995. *Chimie moléculaire et supramoléculaire des sucres*, Editions EDP Sciences. ISBN: 2-86883-373-X.

Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)

Document d'enseignement

Deslongchamps P. 1983. *Stereoelectronic effects in organic chemistry*, Pergamon Press. ISBN: 0080261841.

Drew HDK, Haworth WN. 1926. *A critical study of ring structures in the sugar group*, *Journal of the Chemical Society*, 129, 2303-10. DOI: 10.1039/JR9262902303.

Eliel EL, Wilen SH. 1994. *Stereochemistry of organic compounds*, Editions Wiley-Interscience. ISBN: 978-0-471-01670-0.

Fischer E. 1891. *Ueber die configuration des traubenzuckers und seiner isomeren. II*, *Chemische Berichte*, 24, 2683-7. DOI: 10.1002/cber.18910240278.

Haworth WN. 1929. *The constitution of sugars*, Editions Edward Arnold & Co., Ltd., London. DOI: 10.1002/jctb.5000481006.

Kuhn R. 1932. *Molekulare asymmetrie*. In Freudenberg K (ed.), *Stereochemie*, Deuticke, Leipzig, 439-40.

Mills JA. 1955. The stereochemistry of cyclic derivatives of carbohydrates, *Advances in Carbohydrate Chemistry*, 10, 1-53. DOI: 10.1016/S0096-5332(08)60389-6.

Natta G, Pino P, Corradini P, Danusso F, Mantica E, Mazzanti G, Moraglio G. 1955. *Crystalline high polymers of α -olefins*, *Journal of the American Chemical Society*, 77, 1708-10. DOI: 10.1021/ja01611a109.

Rosanoff MA. 1906. *On Fischer's classification of stereo-isomers*, *Journal of the American Chemical Society*, 28, 114-21. DOI: 10.1021/ja01967a014.

Edité par

Hervé This, INRAE–AgroParisTech International Centre for Molecular and Physical Gastronomy,

UMR 0782 SayFood, professeur consultant AgroParisTech, membre de l'Académie d'agriculture de France, membre correspondant de l'Académie royale des sciences, arts et lettres de Belgique et de l'Académie de Stanislas, membre de l'Académie d'Alsace, sciences, lettres et arts.

Rapporteurs

Luc Eveleigh est maître de conférences à AgroParisTech, et chercheur dans l'UMR 0782 SayFood INRAE-AgroParisTech.

Pierre Giampaoli est professeur dans l'équipe ProBioSSep de l'UMR SayFood. Il est président du Département Sciences et Procédés des Aliments et Bioproduits d'AgroParisTech. Il est responsable du master Nutrition Sciences des Aliments de l'UPSay AgroParisTech.

Rubrique

Cet article a été publié dans la rubrique « Documents d'enseignement » des *Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France*.

Reçu

22 décembre 2020

Accepté

3 février 2021

Publié

17 février 2021

Citation

Juvin J, Belhomme MC, Castex S, Bliard C, Haudrechy A. 2021. Un bon croquis vaut mieux qu'un long discours ?, *Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF)*, 11(2), 1-9.

Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Document d'enseignement



Judith Juvin est doctorante à l'ICMR UMR 7312.



Christophe Bliard est chargé de recherche à l'ICMR UMR 7312.



Marie-Charlotte Belhomme est maître de conférences à l'ICMR UMR 7312.



Arnaud Haudrechy est professeur à l'Université de Reims Champagne-Ardenne. Il est expert international au MESRI et coordinateur scientifique à l'ANR.



Stéphanie Castex est ingénieure de recherche CNRS à l'ICMR UMR 7312.

André Voisin dans le paysage de la recherche agronomique. La notion d'« années de misère » dans les années 1950

André Voisin in the landscape of agricultural research. The notion of "years of misery" in the 1950s

Charlène Bouvier¹

¹ *Laboratoire d'études rurales, Université de Lyon 2*

Correspondance :

Maison des sciences de l'Homme Lyon Saint-Etienne, 16 avenue Berthelot, 69007 Lyon Cedex

charlene.bouvier5@univ-lyon2.fr

Résumé

Ce travail questionne la place qu'occupe André Voisin dans le paysage de la recherche agronomique française dans les années 1950 à travers la controverse autour de la notion des « années de misère ». Pour cela, les travaux d'André Voisin, principalement ses interventions à l'Académie d'agriculture de France, ont été analysés et confrontés aux travaux des principaux acteurs de cette controverse, à savoir René Dumont, Pierre Chazal et Jean Rebeschung. Cette analyse emprunte des concepts aux *Science studies*. Ce champ de recherche, qui permet de penser l'élaboration des connaissances scientifiques comme un processus historique qui découle d'une activité collective, met en lumière les raisons de l'invisibilité d'André

Voisin en France. L'approche de l'agronomie que prône André Voisin et les solutions pratiques qu'il propose pour augmenter la production fourragère française ne répondent pas aux enjeux économiques, politiques et sociaux que représente l'augmentation de la production agricole dans le contexte de pénurie alimentaire d'après-guerre.

Abstract

This work questions André Voisin's place in the French agronomic research landscape in the 1950s through the controversy surrounding the notion of "années de misère". To this end, André Voisin's work, mainly his

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
 (N3AF)
Note historique

lectures at the Académie d'agriculture de France, has been analysed and compared to the work of the main players in this controversy, namely René Dumont, Pierre Chazal and Jean Rebischung. This analysis borrows concepts from Science studies. This method, which makes it possible to think the elaboration of scientific knowledge as a historical process resulting from a collective activity, highlights the reasons for André Voisin's invisibility in France. The approach to agronomy advocated by André Voisin and the practical solutions he proposed to increase French fodder production did not meet the economic, political and social challenges of increasing agricultural production in the context of post-war food shortages.

Mots clés

histoire des sciences, recherche agronomique, style scientifique, prairie, ley-farming

Keywords

history of science, agronomic research, thought style, grassland, ley-farming

Introduction

La place d'André Voisin dans l'histoire de la pensée agronomique est originale à bien des égards, à commencer par la façon dont il est entré dans le débat sur la prairie. Ancien directeur d'usine et ingénieur biochimiste, c'est en 1940 qu'André Voisin reprend l'exploitation familiale en pays de Caux. Pour trouver des solutions aux difficultés qu'il rencontre dans son activité d'éleveur laitier, il se tourne vers les résultats de la recherche agronomique, mais la mise en pratique et les observations qu'il en tire l'amènent à questionner cette science et ses résultats. L'introduction du terme « années de misère » par André Voisin dans la recherche agronomique française découle de cette démarche et s'inscrit dans une controverse de longue durée autour de

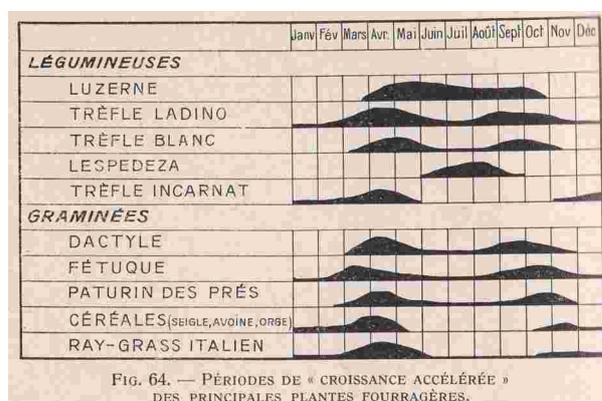


Figure 1. Tableau issu de L'exploitation intensive des Prairies (Der Khatchadourian, 1954).

l'exploitation des prairies. Cette controverse, qui se développe dans les années d'après-guerre marquées par l'urgence à nourrir la population française et à tirer les « leçons de l'agriculture américaine » (Dumont, 1949), se traduit par la généralisation du retournement des prairies permanentes et leur introduction dans la rotation des cultures (Figure 4). Cette pratique ne fait toutefois pas l'unanimité et, rapidement, le débat se cristallise autour de ce qui prend le nom de *ley-farming*. Il voit s'opposer André Voisin, défenseur de la prairie permanente, et les partisans du retournement des prairies permanentes que sont notamment René Dumont, Pierre Chazal et Jean Rebischung. Malgré des débats indécis, les idées qu'André Voisin défend dans ses travaux ne sont pas reprises par les acteurs de la recherche agronomique française, posant la question de l'espace des possibles d'une prise en compte des potentialités de l'écosystème prairial dans le contexte des décennies modernisatrices (Voisin, 1956a ; 1956b ; 1956c ; 1956d ; 1956e).

Cette controverse constitue un moment fondateur de l'histoire écologique, scientifique et politique de la prairie en France, structurée depuis plus d'un demi-siècle autour des enjeux de la révolution fourragère. Nous envisageons en effet la prairie comme un « objet total », à la fois biologique, économique, scientifique et

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Note historique



Photo 7. — Très bon décroûtage de 4 cms d'épaisseur (Isère)

Figure 2. Photographie issue de *Le guide pratique de la révolution fourragère* (Chazal, 1956).

politique, inscrit dans la spatialité physique aussi bien que dans l'espace des controverses sur le développement agricole. À travers l'analyse de la notion d'« années de misère » d'André Voisin, c'est ainsi à comprendre comment la prairie s'est retrouvée au cœur des enjeux de la modernisation agricole, mobilisant à la fois la recherche publique, des instituts techniques liés à la profession agricole et des acteurs des politiques publiques, le tout dans une montée des tensions autour des aspects biologiques, techniques, sociaux et politiques de la nutrition animale, que nous entendons consacrer l'analyse historique qui suit.

La notion pré-scientifique d'« années de misère »

Dans son article « Grandeurs et faiblesses du *Ley-Farming* » publié dans le Bulletin Technique d'Information en 1953, André Voisin consacre deux sous-parties entières à ce qu'il nomme les « années de misère » et à leur origine. Il entend par cette notion « les années de plus faible production qui suivent les années de très forte production, se manifestant au début de la vie des herbages nouvellement semés » (Voisin, 1953a). Elles apparaissent entre la troisième et la cinquième année après le retournement de la

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Note historique

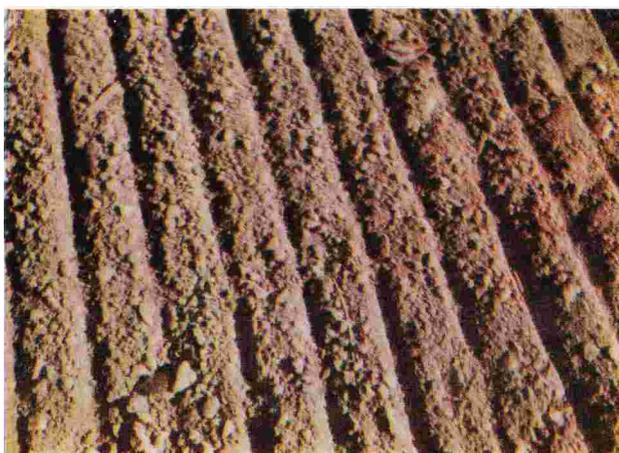


Photo 2. — Après un passage de cultipaker

Figure 3. Photographie issue de Le guide pratique de la révolution fourragère (Chazal, 1956).

prairie et se maintiennent en général jusqu'à la septième année avant que la prairie ne retrouve un rendement considéré comme normal. Malgré cette définition assez précise et le fait que ce processus soit connu et observé par les scientifiques et les professionnels, André Voisin précise que ce phénomène n'a pas été étudié en France. Il est absent des publications scientifiques et il n'existe aucun terme pour le désigner (Voisin, 1961). Or, dans son réquisitoire contre le retournement des prairies permanentes, qu'il qualifie d'« exploitation minière » des herbages », selon l'expression d'Adrien de Gasparin (Voisin, 1953a), André Voisin souhaite faire des « années de misère » un argument central d'une réhabilitation de la prairie naturelle. Pour cela, il emprunte le terme *Hungerjahr* à la recherche allemande et le traduit en « années de misère » (Voisin, 1961). Il semble que ce terme apparaisse pour la première fois dans cet article de 1953 avant de se diffuser dans la littérature technique française à travers les réponses qui sont faites à André Voisin.

Ce dernier ne se contente pas de nommer et de définir ce phénomène, il en fait un véritable objet d'étude. En effet, il cherche à identifier les causes de la baisse de rendement fourragère des prairies.

À partir d'une importante bibliographie, il liste et explique les différentes hypothèses émises pour comprendre ce phénomène. Elles sont de deux natures : botanique et pédologique. Tout d'abord, il met en cause l'utilisation des semences sélectionnées lors du resemis des prairies temporaires. Ces semences seraient peu à peu remplacées par des variétés locales dont la croissance se verrait favorisée par leur adaptation aux conditions climatiques locales. Il rapporte aussi l'hypothèse selon laquelle l'évolution de la composition botanique d'une prairie serait influencée par les méthodes d'exploitation. Pour ce qui est de la dimension pédologique, André Voisin mentionne le rôle de la structure spécifique du sol d'une prairie, caractérisée par la présence d'une sous-couche de racines sous le gazon (Figure 2). Cette sous-couche est détruite lors du retournement, et le sol acquiert alors une structure de sol de labour qui n'est pas favorable à la croissance de la flore prairiale. Après quelques années, le sol commence à retrouver sa structure herbagère et la flore prairiale refait son apparition au détriment des semences sélectionnées, qui seraient plus adaptées à un sol de labour qu'à un sol herbager. Enfin, les très hauts rendements des semences sélectionnées seraient responsables d'un important appauvrissement du sol en matières organiques et en éléments minéraux, dont les réserves ne se reconstitueraient qu'à travers le travail de la micro-flore et de la micro-faune prairiales détruites lors du retournement (Voisin, 1953a) (Figure 3).

Si André Voisin ne fait qu'énumérer des hypothèses d'autres chercheurs, il conclut tout de même que le « complexe « sol, flore, micro-flore, micro-faune » [...] représente un capital épargné considérable qui ne doit être touché que le moins possible par des mesures brutales telles que le retournement » (Voisin, 1953). À cette étape, André Voisin propose ce que, à la suite de l'épistémologue Ludwik Fleck (Fleck, 2005), nous appelons une pré-idée scientifique. Celle-ci est le fruit d'« un amalgame chaotique d'idées » qu'il tire de ses observations et de ses

Note historique

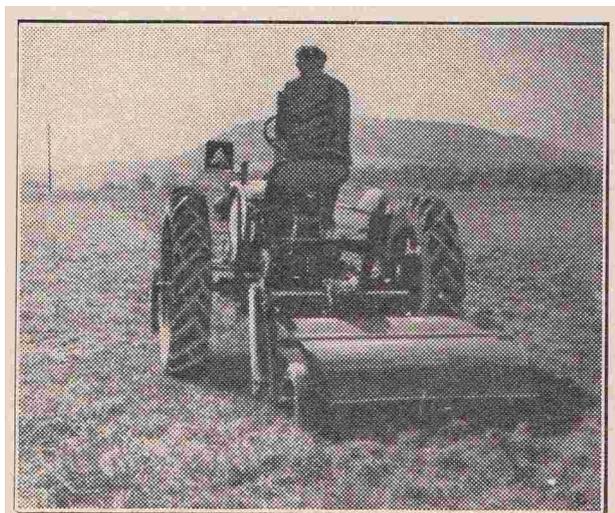


FIG. 68. — LE « ROTAVATOR » AU TRAVAIL
DANS UNE PRAIRIE DÉGRADÉE.

Figure 4. Photographie issue de *L'exploitation intensive des Prairies* (Der Khatchadourian, 1954).

connaissances sur la prairie. Elle est « le point de départ du développement d'un concept » et non une connaissance scientifique. À ce titre, c'est à « sa valeur heuristique en tant que terrain favorable à un développement » qu'il faut s'intéresser, et non à sa valeur en tant que vérité scientifique. En effet, André Voisin ne s'arrête pas à un constat d'absence de connaissances puisqu'il invite la recherche agronomique à se saisir de la question de la prairie et génère ainsi une controverse avec les partisans de la révolution fourragère (Voisin, 1954).

Dans un premier temps, il déplore que « beaucoup de théoriciens de l'herbe, dans de nombreux pays, ont d'abord voulu nier l'existence des "années de misère" pourtant bien connues des "empiristes" paysans". [Ils] se sont contentés de dire que les "années de misère" n'existaient que si les prairies temporaires étaient mal établies » (Voisin, 1961). Pour remédier à cette rupture et approfondir la connaissance des « années de misère », André Voisin souhaiterait voir les expérimentations chiffrées sur les prairies permanentes et les prairies retournées se

développer afin de pouvoir comparer les rendements de chacune. Afin de prendre en compte le complexe qui caractérise le sol herbager dans l'amélioration de la production fourragère, « il faut qu'à la sélection botanique, faite actuellement d'une manière impeccable, s'ajoutent des essais réels malheureusement beaucoup plus compliqués et onéreux, et surtout beaucoup plus longs, qui dureront peut-être des dizaines d'années » (Voisin, 1953a) (Figure 1). André Voisin aborde ici une autre direction qu'il souhaite voir la recherche agronomique prendre : celle d'un temps long du suivi des performances des pratiques. « L'expérience agronomique, dans ce domaine comme dans d'autres, est une œuvre de longue haleine, car il s'agit, en fait, du bouleversement de certaines conditions naturelles dont certaines conséquences graves ne peuvent apparaître quelquefois que bien des années après », écrit-il dans une forme précoce d'analyse systémique (Voisin, 1953a).

André Voisin et les chercheurs allemands, le rôle du réseau scientifique

Il a été rapidement mentionné qu'André Voisin nourrissait sa réflexion sur les « années de misère » à partir d'une importante bibliographie. En réalité, ses lectures jouent un double rôle puisqu'elles participent aussi à la rhétorique scientifique qu'André Voisin développe pour apporter de la solidité, et donc de la légitimité, à son analyse. En effet, comme l'a analysé Bruno Latour dans son ouvrage *La science en action* (Latour et Biezunski, 1995), les controverses scientifiques, moments particulièrement riches pour l'historien, poussent les chercheurs à construire une argumentation des plus solides en vue de convaincre, mais, aussi, de résister à la critique. Cette argumentation prend la forme d'un réseau scientifique que le chercheur construit en citant les scientifiques et leurs travaux qui nourrissent et valident sa réflexion. Ces auteurs deviennent alors les

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Note historique

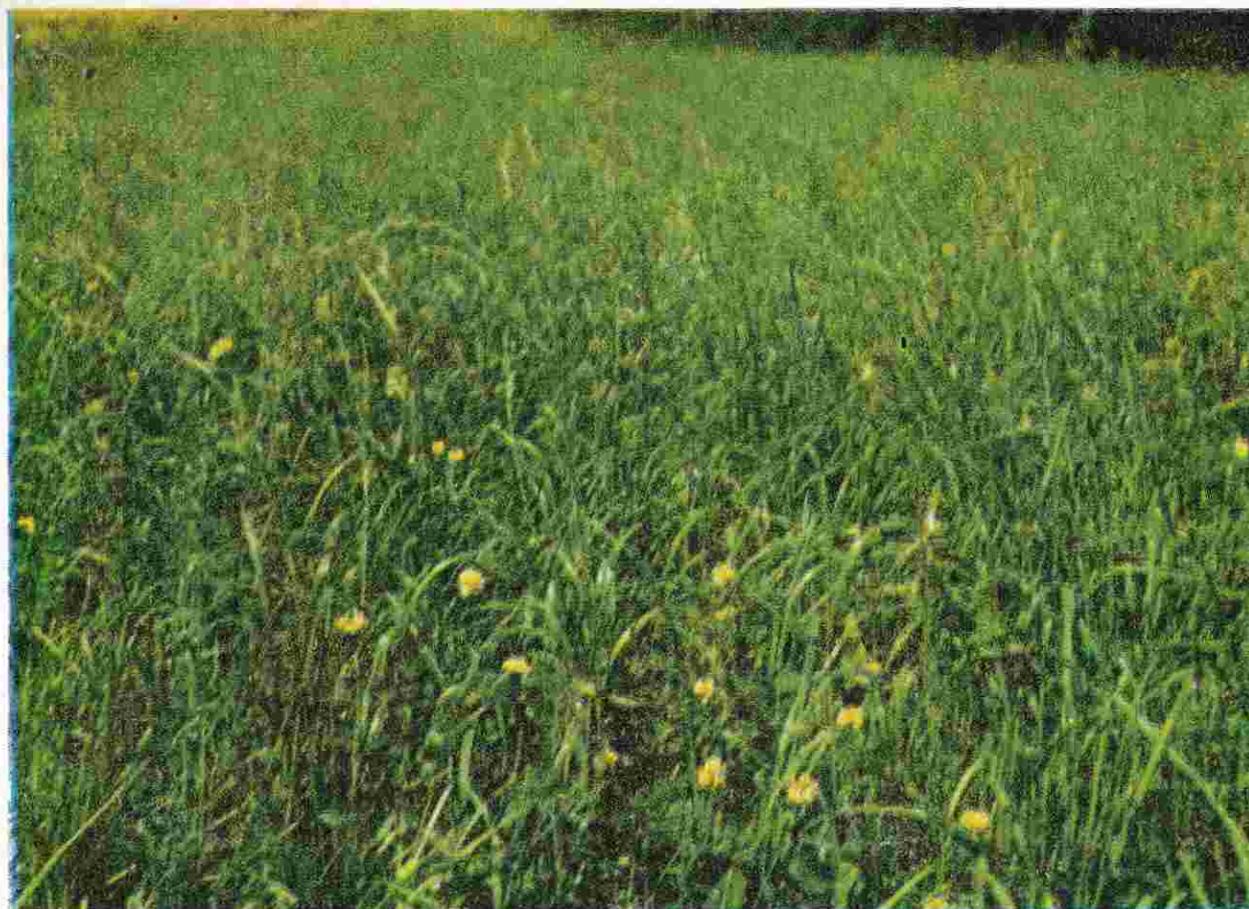


Photo 11. — Très bon équilibre graminées (dactyle, ray-grass),
légumineuses (trèfle blanc) (Isère)

Figure 5. Photographie issue de *Le guide pratique de la révolution fourragère* (Chazal, 1956).

alliés, physiques ou virtuels, du chercheur qui s'y réfère. Plus un chercheur dispose d'alliés, plus son argumentation devient solide et difficile à réfuter. L'analyse de la rhétorique scientifique d'André Voisin qui passe par un examen de sa bibliographie, mais aussi de la structure de son texte, permet de mettre en évidence le réseau qu'il construit et les alliés dont il mobilise les recherches à cet effet. Non seulement son article sur le *ley-farming* s'accompagne d'une importante bibliographie scientifique, mais ses alliés sont aussi présents tout au long de son

développement grâce aux citations qu'il y a intégrées.

Si l'on s'attarde un peu plus longuement sur ses alliés, on s'aperçoit qu'il s'agit principalement d'auteurs allemands. André Voisin explique cela par le fait que les « années de misère » « n'ont guère été étudiées systématiquement et scientifiquement qu'en Allemagne » (Voisin, 1953a). S'il commence par citer Adrien de Gasparin qui décrit « les temps d'arrêt » qui suivent le retournement d'une prairie permanente, il multiplie ensuite les citations

Note historique

d'auteurs allemands. Pour définir les « années de misère », il s'appuie sur des ouvrages généraux comme *Erfolgreiche Grünland-wirtschaft* (soit « Exploitation des herbages avec succès » ; cette traduction et les suivantes ont été réalisées par André Voisin) de Horst von Bleichert (1951) et sur des écrits plus spécifiques comme l'article de E. Sachs qui s'intitule *Umbruch oder Umbruchlose Verbesserung unserer schlechten Wiesen* (« Amélioration avec ou sans retournement de nos mauvais prés de fauche ») (Voisin, 1953a). Le détail d'une expérience menée par la *Studiengesellschaft zur Förderung der Grünlandwirtschaft* (« Société d'études pour le développement des herbages »), qui compare les rendements d'un pré retourné à ceux d'un pré non retourné durant neuf ans, permet d'illustrer le phénomène des « années de misère ». Enfin, pour ce qui est de l'explication des causes des « années de misère », qui sont principalement pédologiques comme nous l'avons vu, André Voisin se tourne vers des travaux de physique du sol comme ceux de Johannes Görbing, *Die Grundlagen der Gare im praktischen Ackerbau* (« Méthodes pour obtenir une terre meuble dans la culture pratique des champs ») (1947), où l'auteur observe « la structure miettée d'un sol parfaitement meuble » qu'a prise une terre argileuse lourde grâce à l'action longue de la couche de gazon spécifique à la prairie permanente (Voisin, 1953a).

L'état actuel de nos recherches ne nous permet pas d'apporter plus d'informations sur les méthodes de recherche allemandes ou sur les connaissances acquises outre-Rhin au sujet des « années de misère ». Cependant, ce qu'il est important de retenir ici est la démarche d'André Voisin qui consiste à s'appuyer sur des références étrangères qu'il importe dans une controverse française.

Les « années de misère » dans le contexte de la « révolution fourragère » : quelle réception possible ?

Comme l'a indiqué la rédaction du *Bulletin*

Technique d'Information en en-tête de l'article d'André Voisin de 1953, sa publication n'a pas manqué de susciter une controverse qui se saisit de la pré-idée scientifique des « années de misère » pour lui dénier, justement, toute capacité à s'affirmer comme idée scientifique à part entière. Dans son article réponse de 1954, Jean Rebuschung, spécialiste de la révolution fourragère, reprend le terme d'« années de misère » et la définition qu'en donne André Voisin, mais élargit ce phénomène aux prairies permanentes et n'en fait donc pas la conséquence du retournement.

À partir d'une expérimentation réalisée à la ferme de Courcelles-Chaussy sur deux herbages permanents, il conclut que les « années de misère » sont dues à l'évolution que les apports de fumure entraînent sur la composition botanique des herbages. Un herbage composé « en majorité de Ray-grass anglais, d'un peu de Pâturin des Prés, de Dactyle, d'Agrostis en quantité négligeable et de Trèfle blanc » et qui reçoit une fumure adaptée, ne connaît pas d'« années de misère » (Figure 5). Le retournement des prairies permanentes tel que le conçoit Jean Rebuschung est donc une pratique qui assure l'augmentation de la production des prairies. Ce dernier prétend d'ailleurs qu'Olivier de Serres présentait déjà les choses de cette façon dans son *Théâtre d'Agriculture et Mesnage des Champs* de 1600 (Rebuschung, 1954).

De son côté, Pierre Chazal constate qu'« en général, dès la deuxième ou la troisième année, les prairies semées avec un mélange « tout fait » donnent un rendement très inférieur aux années précédentes », mais il s'empresse d'affirmer que ni lui ni René Dumont « ne cro[ient] aux années de misère » (Chazal et Dumont, 1954). S'il observe le même phénomène qu'André Voisin, il refuse donc la tentative de ce dernier d'en faire un objet de recherche pour l'agronomie. Tout comme Jean Rebuschung, il considère qu'« apporter la fertilisation nécessaire et [qu']exploiter correctement » empêchent l'apparition des vides dans les prairies retournées. Le fait que Pierre

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Note historique



Photo 6. — Décroûtage au rotavator (Isère)

Figure 6. Photographie issue de Le guide pratique de la révolution fourragère (Chazal, 1956).

Chazal donne ces précisions sur les « années de misère » en note de bas de page contribue à faire de celles-ci un phénomène connu et contrôlé par la science agronomique et qui n'est pas un problème central dans l'augmentation des rendements fourragers. Une telle réception de la pré-idée d'André Voisin s'explique par le décalage entre les hypothèses et le réseau d'André Voisin et le collectif de pensée que constitue la recherche agronomique française. Selon Ludwik Fleck, un collectif de pensée correspond à une « communauté de personnes qui échangent des idées ou qui interagissent intellectuellement » (Fleck, 2005). Au sein de ce collectif, la recherche et les échanges s'effectuent selon un style

scientifique précis qui est le fruit du processus historique d'élaboration de connaissances scientifiques par ce collectif. Il dépend des connaissances acquises et détermine ce qu'est un objet de recherche pertinent, les méthodes utilisées pour étudier ces objets et les critères qui permettent d'accorder le statut de vérité à une connaissance.

Si les agronomes français rejettent les hypothèses d'André Voisin, c'est qu'elles ne correspondent pas à leur style scientifique. Plus concrètement, les agronomes ne se saisissent pas du « complexe « sol, flore, micro-flore, micro-faune » » d'André Voisin, qui s'éloigne par trop de leur manière d'étudier le sol dans les

Note historique

années 1950, davantage fondée sur une approche physico-chimique que sur une analyse biologique et botanique.

La pénurie d'engrais minéraux durant la Seconde Guerre mondiale a contribué à orienter la réflexion sur le rôle que jouent les matières organiques dans la fertilité du sol. En 1944, Albert Demolon insiste sur le fait que sans fumure minérale, le « niveau de productivité [...] sera conditionné par l'importance des réserves » humiques du sol. Il termine d'ailleurs son intervention à l'Académie d'agriculture de France en encourageant l'agriculture à « s'orienter résolument vers un élargissement de la technique de fertilisation en vue d'assurer aux matières humiques une place adéquate à leur rôle » (Demolon et Batisse, 1944).

Ce sont principalement les propriétés physiques du sol qui sont étudiées par Stéphane Hénin (Hénin et Dupuis, 1945), principal porteur du renouveau de la recherche en agronomie dans l'après-guerre, au détriment des propriétés biologiques, sur lesquelles repose la conception du sol d'André Voisin ainsi que le rôle fertilisant que ce dernier donne au fumier (Voisin, 1953b).

L'état des connaissances sur les propriétés physiques de l'humus et de son rôle de réserve de matières fertilisantes permet à René Dumont de mettre au point ce qu'il appelle la « révolution fourragère » qui repose sur la « récupération de l'humus "stérilisé" dans le vieux pré », en retournant les prairies permanentes (Chazal et Dumont, 1954) (Figure 6).

Contrairement à la pré-idée scientifique d'André Voisin, la méthode d'exploitation élaborée par René Dumont et Pierre Chazal correspond au style scientifique du collectif de pensée dominant, à savoir celui qui élabore la politique agricole de l'après-guerre. Professeur à l'Ina de Paris et associé aux travaux du Plan, René Dumont est une voix majeure de l'orientation du monde agricole français. Dans un contexte où la production agricole doit augmenter pour garantir l'alimentation de la population française (Cornu et al., 2018), la méthode de René Dumont et Pierre Chazal apparaît comme la réponse pratique idéale ou, comme le dit René Dumont lui-même,

comme le « levier le plus important du relèvement de notre production agricole et, par là, du sauvetage de notre pays » (Dumont et Chazal, 1954). En effet, elle assure l'augmentation de la production agricole malgré les difficultés d'approvisionnement en engrais minéraux (Lenglen, 1945) et organiques (Voisin, 1953b).

Le fait que René Dumont émette lui-même des doutes quant à une méthode d'exploitation dont « les techniques (...) ne sont pas au point » (Chazal et Dumont, 1954) n'empêche pas le collectif de la valider et de la promouvoir. Jean Rebischung, acteur majeur de la vulgarisation de la recherche agronomique, écrit ainsi en 1954 : « Dans la situation agricole actuelle, il est nécessaire de quitter les sentiers battus, surtout si l'on a la sécurité de réussir en le faisant. Un nombre suffisant d'essais ont prouvé l'intérêt du *ley-farming* pour qu'il puisse être adopté avec autant de facilité qu'une nouvelle variété de céréale, et avec les mêmes garanties. Il suffit de citer l'exemple d'un fermier du Lyonnais, parmi tant d'autres dont M. Dumont précisera prochainement l'évolution, possédant, en 1948, 25 hectares produisant 10.000 litres de lait par an à cette époque et 60 à 80 quintaux de blé, qui a pu, grâce à la modification de son système de culture, accroître la surface de sa propriété de 9 hectares, sa production en lait de 36.000 litres et doubler celle du blé ».

Face à une telle adéquation entre les impératifs sociaux auxquels doit répondre le collectif de pensée dominant et la solution pratique proposée par René Dumont et Pierre Chazal, la pré-idée scientifique d'« années de misère » d'André Voisin n'est pas retenue, bien qu'elle s'appuie sur un réseau scientifique solide. Elle ne fait que soulever des questions sans réponse et sans protocole scientifique réalisable à court terme, dans un moment où le passage à l'action est nécessaire et où, comme le dit Jean Rebischung à André Voisin, « il ne suffit pas d'énoncer un principe : il faut encore, en plus, préciser ses modalités d'application pratique » (Rebischung, 1954).

Note historique

Conclusion

La mobilisation des concepts de l'épistémologie historique des sciences appliquées nous a ainsi permis d'expliquer l'invisibilité des travaux d'André Voisin sur les « années de misère » dans le paysage de la recherche agronomique française des années 1950. En effet, penser l'élaboration des connaissances scientifiques comme un processus historique qui découle d'une activité collective apporte des éléments indispensables à la saisie de la controverse qui a opposé André Voisin aux agronomes français. Tout d'abord, les deux argumentations qui s'affrontent ne concernent pas le même aspect de la démarche scientifique, l'une concernant l'élaboration de connaissances scientifiques pratiques, alors que l'autre vise à faire évoluer la manière d'élaborer des connaissances scientifiques. Inscrites dans une étroite relation à la vie sociale et politique de son époque, la recherche agronomique ne peut être analysée que dans une double contextualisation, à la fois en termes d'histoire des sciences, et d'histoire de l'agriculture. Les controverses scientifiques du passé, qui peuvent nous apparaître incompréhensibles au regard des instruments de connaissance et des objets d'attentions actuels, se révèlent ainsi dans leur cohérence : celle de systèmes à la fois sociaux, techniques et cognitifs.

Ces controverses sont le fruit de la rencontre entre des postures ou styles scientifiques qui ont chacun leurs doutes et leurs nuances, mais qui sont pour partie incommensurables les uns par rapport aux autres, du fait qu'ils ne se fondent pas sur les mêmes pré-idées, non plus que sur les mêmes développements méthodologiques et façons de produire des preuves à la fois de solidité scientifique et d'efficacité pratique. Le débat sur les « années de misère », qui s'est porté essentiellement sur le degré d'artificialisation des ressources fourragères, est l'occasion pour l'historien des sciences de mettre en lumière la complexité du système liant pratiques, recherche et innovation, mêlant des facteurs économiques, politiques et scientifiques.

Si la controverse autour des thèses d'André Voisin a été résolue assez vite dans la recherche française au détriment de ce dernier, on sait que d'une part la réflexion sur les « années de misère » a eu une postérité étonnante dans les Caraïbes et en Amérique latine, et d'autre part que la controverse sur la prairie « naturelle » a connu une forte résurgence dans la génération suivante de chercheurs français. Il y a une « actualité André Voisin », liée notamment à la façon dont l'approche agro-écologique « relit » les propositions scientifiques du passé à la lumière d'une approche systémique des productions végétales (Morlon et al., 2021). Pour l'historien, c'est une démonstration très éclairante de ce qu'une controverse scientifique ne s'inscrit pas dans un absolu, mais dans une conjonction de facteurs qui permettent ou non à des styles de connaissance de se développer. Il ne s'agit nullement d'affirmer une posture relativiste, mais tout simplement historique : la recherche, c'est un questionnement situé, et c'est ce qui en fait la difficulté et la richesse.

Je remercie Pierre Morlon pour le partage des sources sur lesquelles s'appuie en partie ce travail. Je remercie également Pierre Morlon, André Pflimlin, Gilles Lemaire et Paulo César de Faccio Carvalho pour nos échanges au sujet d'André Voisin et pour l'opportunité d'intervenir à l'Académie d'agriculture qu'ils m'ont offerte.

Références

Bonneuil C, Denis G, Mayaud JL (eds). 2008. *Sciences, chercheurs et agriculture : pour une histoire de la recherche agronomique*. Quae; L'Harmattan, Versailles.

Canguilhem G. 2009. *Idéologie et rationalité dans l'histoire des sciences de la vie: nouvelles études d'histoire et de philosophie des sciences*. Vrin, Paris.

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)

Note historique

- Chazal P, Dumont R. 1954. La nécessaire révolution fourragère et l'expérience lyonnaise. *Le Journal de la France Agricole*, Paris.
- Chazal P. 1956. *Le guide pratique de la révolution fourragère*. Ed. du Journal de la France Agricole, Paris.
- Cornu P, Valceschini E, Maeght-Bournay O. 2018. *L'histoire de l'INRA, entre science et politique*. Éditions Quae, Versailles.
- Demolon A, Batisse E. 1944. Productivité et épuisement des sols, *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 30, 186-188.
- Der Khatchadourian L. 1954. *L'exploitation intensive des prairies*. Hachette, Paris.
- Dumont R. 1949. *Les leçons de l'agriculture américaine*. Flammarion, Paris.
- Dumont R. 1956. *Voyages en France d'un agronome*, M.-Th.Génin, Paris.
- Fleck L. 2005. *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache (1935)*. Traduction française par Nathalie Jas : *Genèse et développement d'un fait scientifique*. Les Belles Lettres, Paris.
- Hénin S, Dupuis M. 1945. Essai de bilan de la matière organique des sols, *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 31, 51-52.
- Hubert B, Mathieu N, Arnauld de Sartre X, Jollivet M, Martinand JL (eds). 2016. *Interdisciplinarités entre Natures et Sociétés*. Peter Lang, Bruxelles.
- Klapp E. 1954. Mon opinion sur le Ley Farming, *Bulletin Technique d'Information*, 94, 615-617.
- Latour B, Biezunski M. 1995. *La science en action : introduction à la sociologie des sciences*. Gallimard, Paris.
- Latour B. 2006. *Nous n'avons jamais été modernes: essai d'anthropologie symétrique*. La Découverte, Paris.
- Lenglen M. 1945. Rapport sur la situation de notre ravitaillement en engrais, *Comptes rendus des séances de l'Académie d'agriculture de France*, 31, 171-179.
- Mallet A. 1954. Bases du progrès de l'Agriculture Anglaise et Technique du Ley Farming, *Bulletin Technique d'Information*, 94, 617-626.
- Morlon P, Lemaire G, Pflimlin A, Bouvier C, Faccio Carvalho PC. 2021. André Voisin, éleveur laitier en Normandie et chercheur indépendant, *Encyclopédie de l'Académie d'agriculture de France*. <https://www.academie-agriculture.fr/publications/encyclopedie/question-s-sur/1101q03-andre-voisin-eleveur-laitier-en-normandie-et>, dernier accès 2021-04-04.
- Mougenot C. 2011. *Raconter le paysage de la recherche*. Quae, Versailles.
- Rebischung J. 1954. A propos du Ley-Farming, *Bulletin Technique d'Information*, 94, 605-615.
- Voisin A. 1949. La rotation des herbages, *Revue de l'élevage*, 28-38.
- Voisin A. 1953a. Grandeurs et faiblesses du Ley-Farming, *Bulletin Technique d'Information*, 82, 673-704.
- Voisin A. 1953b. Production de fumier et productivité agricole, *Économie rurale*, 18(1), 29-32.
- Voisin A. 1954. A propos du « Ley-farming », *Bulletin technique d'information*, 94 (2), 603-626.
- Voisin A. 1956a. L'exploitation rationnelle des pâturages très dégradés les transforme en pâturages de haute qualité, *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 42, 314-320.

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)

Note historique

Voisin A. 1956b. Le caractère héréditaire de la vache détermine la quantité d'herbe qu'elle récolte, *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 42, 467-475.

Voisin A. 1956c. Le facteur temps doit régler le pâturage rationnel, *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 42, 581-590.

Voisin A. 1956d. *Le principe de base du pâturage rationnel*, *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 42, 209-214.

Voisin A. 1956e. Productivité de l'herbe, *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 42, 529-542.

Voisin A. 1961. Sommes-nous contraints de retourner les pâtures pour les améliorer, *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 47, 541-554.

Édité par

Gilles Lemaire, membre de l'Académie d'Agriculture de France, est directeur de recherche honoraire à l'INRAE, où il a mené une activité de recherche en écophysiologie des prairies au Centre INRA Poitou-Charentes de Lusignan jusqu'en 2009.

Rapporteurs

Daniel Sauvart est professeur émérite dans l'UFR Nutrition animale, Qualité des Produits et Bien-être et dans l'UMR INRAE-AgroParisTech Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants (MoSAR), vice président de l'Association française de zootechnique, membre de l'Académie d'agriculture de France, membre correspondant de l'Académie vétérinaire de France.

Raphaël Larrère est agronomie et sociologue, membre de l'Académie d'agriculture de France.

Rubrique

Cet article a été publié dans la rubrique « Note historique » des *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France*.

Reçu

17 janvier 2021

Accepté

2 avril 2021

Publié

14 avril 2021

Citation

Bouvier C. 2021. André Voisin dans le paysage de la recherche agronomique. La notion d'« années de misère » dans les années 1950, *Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF)*, 11(3), 1-12. <https://doi.org/10.58630/pubac.not.a663356>.



Charlène Bouvier est doctorante en histoire au Laboratoire d'Études Rurales, sous la direction de Pierre Cornu. Sa thèse s'intitule *Pour une histoire écologique de la prairie dans la seconde moitié du 20^e siècle. Les enjeux de la biodiversité prairiale entre sciences, techniques et environnement*.

Confiance, innovation, progrès *Trust, innovation, progress*

Claude Debru ¹

¹ Centre d'archives en philosophie, histoire et édition des sciences (UMS 3610 CNRS/École normale supérieure)

Correspondance :
45 rue d'Ulm, Paris
claude.debru@ens.fr

Résumé

À partir d'une analyse philosophique et sociologique de la confiance comme mécanisme de réduction de la complexité sociale, on aborde d'une manière synthétique des questions reliées, celle de la confiance dans la science et des enquêtes la mesurant, celles de l'innovation et de la relation entre science fondamentale et recherche appliquée, celle de l'évaluation du risque et celle de la logique de la preuve, enfin celle de la relation entre innovation scientifique et progrès de la société. En conclusion sont présentées des remarques sur les liens vitaux à double sens entre recherche et application et sur le journalisme scientifique.

Abstract

Starting from a philosophical and sociological analysis of trust as a reduction mechanism of social complexity, related questions are dealt with in a synthetical way : trust in science and its measurement ; innovation and relationship between fundamental science and applied

research ; risk evaluation and logic of proof ; relationship between scientific innovation and progress in society. Final remarks on the vital double link between science and application, and on scientific journalism are proposed.

Mots clés

Application, confiance, CRISPR-Cas9, innovation, invention, journalisme, preuve, progrès

Keywords

Applied research, trust, CRISPR-Cas9, innovation, invention, journalism, progress, proof

Lors d'un entretien récent consacré aux sources de l'hésitation vaccinale, phénomène d'ampleur récente en France (Raude, 2020), le psychologue de la santé et des maladies infectieuses Jocelyn Raude a identifié plusieurs facteurs : l'émergence de la question des liens et conflits d'intérêt ; le développement du complotisme *via* de nombreux réseaux sociaux particulièrement

actifs ; le scandale sanitaire suscité par la gravité des effets secondaires d'un médicament (le *Mediator*) ; la dimension politique « antisystème » de l'attitude antivaccinale. À cela peut s'ajouter la perte de mémoire générale de nos sociétés, par exemple sur les succès des vaccinations dans l'éradication de maladies infectieuses. Notons cependant le caractère extrêmement labile du refus et de l'acceptation.

Le phénomène nouveau du renversement de la confiance dans les vaccinations (confiance largement prédominante en France jusqu'au début des années 2000), en forte défiance, n'est qu'un aspect d'un phénomène endémique d'augmentation de la défiance qui se généralise dans nos sociétés ouvertes et démocratiques, en raison, entre autres, de la croissance de la complexité sociale et de la difficulté croissante du consensus social qui s'ensuit.

Cette complexité croissante du monde social, difficile à maîtriser sur les plans cognitif et émotif, et de plus en plus avec les réseaux sociaux, a pour conséquence la crise de confiance observée aujourd'hui. Cette situation a suscité un regain d'intérêt pour les aspects sociologiques, philosophiques, politiques de la confiance, thème qui revient d'une manière obsédante dans le débat public et dans les réflexions de nombreuses institutions nationales et internationales, en particulier touchant la confiance dans les sciences (Chevallier-Le Guyader, 2020).

Dans cette contribution, je m'interrogerai d'abord sur la nature de la confiance, tant d'un point de vue philosophique que sociologique. Puis j'examinerai la question de la confiance dans les sciences, et de ses limites tant du fait de problèmes internes aux sciences (fiabilité scientifique, désaccords entre scientifiques), que du point de vue de la compréhension des sciences par la société. Enfin j'aborderai la question de l'acceptation des innovations scientifiques et techniques (les deux étant liées), ainsi que la valeur reconnue ou non à l'idée de progrès. N'étant pas toujours

spécialiste de ces questions, je les examinerai d'un point de vue généraliste, principalement philosophique.

La confiance : aspects philosophiques et sociologiques

La question « Qu'est-ce que la confiance ? » est un grand sujet philosophique. Pour y répondre, je m'appuierai pour ma part sur les travaux de deux philosophes-sociologues allemands, Georg Simmel et Niklas Luhmann. Professeur de philosophie nommé à l'université allemande de Strasbourg en 1914, auteur d'une œuvre remarquable d'un point de vue anthropologique, Georg Simmel remarquait que la confiance est attribuée dans des situations intermédiaires entre plein savoir et totale ignorance (Tiran, 1997 ; Simmel, 1999a ; 1999b ; Quéré, 2001 ; 2005 ; Marzano, 2010). Il estimait que l'attribution de confiance en fonction de la proportion de savoir et de non-savoir est variable selon les époques, les domaines concernés et les individus. Il a consacré des travaux à la confiance en matière financière (Simmel, 2014). La confiance en la monnaie est un symbole et un moyen de l'ordre social, de la stabilité et de la sécurité des échanges. Sans la confiance, la nature essentielle de la monnaie est détruite.

Comme toute croyance, la confiance, qui ne va pas de soi, implique l'assurance donnée par un gage. Que la confiance-croyance repose sur un gage, une sorte de créance, a été fortement souligné par le linguiste Émile Benveniste dans ses travaux sur les langues indo-européennes (Benveniste, 1960).

Beaucoup plus récemment, Niklas Luhmann, fonctionnaire territorial devenu professeur de sociologie à l'université de Bielefeld, a élaboré une théorie systémique de la société, dont l'une des thèses cardinales est que la complexité sociale croît (Luhmann, 2017). Il montre alors la nécessité de la confiance comme mécanisme de réduction

de cette complexité. Luhmann a décelé une situation assez paradoxale dans l'acte de confiance, du point de vue de la temporalité. La confiance transporte l'information du passé pour risquer une détermination de l'avenir. Nous avons besoin de la confiance pour nous réassurer vis-à-vis d'un futur dont la complexité (les possibilités qu'il contient) reste indéterminée. Selon la formulation de Luhmann, celui qui s'engage dans la confiance assure son futur présent sur un présent à venir. Par cet acte de confiance portant sur le futur, il réduit la dimensionnalité du problème et la complexité du monde à venir. Cette situation est paradoxale. En effet : « Là où il y a confiance, il existe davantage de possibilités d'expérience et d'action, la complexité du système social s'accroît, et donc le nombre de possibilités que celui-ci peut réconcilier par sa structure, puisque réside dans la confiance une forme plus efficace de réduction de la complexité. » La confiance à la fois modère et facilite la croissance de la complexité sociale. Nous ne sommes pas loin de la simplicité, chère à Alain Berthoz (2009).

Luhmann a également distingué la confiance entre individus et la confiance dans les institutions, la confiance directe et la confiance indirecte. La distinction proposée par Luhmann est d'autant plus pertinente que les signes sur lesquels s'établissent la confiance dans les institutions et la confiance entre individus sont différents.

Ici se pose une importante question philosophique : laquelle est première, de la confiance ou de la méfiance ? D'un point de vue intuitif, il y a une grande variabilité individuelle et une grande variété de situations dans l'abord que nous avons les uns des autres. Certains sont portés à faire confiance, d'autres non. En général, la confiance se bâtit au fur et à mesure de l'expérience. La confiance est une relation dissymétrique de dépendance entre celui qui la donne et celui qui la reçoit. Élément fondamental du lien social, elle se crée dans son apprentissage

dès les débuts de la vie humaine (Luhmann, 2017). Il existe une « confiance de base », répondant à un « besoin de confiance ». Pour autant, Luhmann observe que la méfiance « a une tendance inhérente à se confirmer et à se renforcer dans les relations sociales » (Luhmann, 2006). « Un système social qui a besoin du comportement méfiant de ses participants en vue de certaines fonctions ou ne peut l'éviter, a besoin en même temps de mécanismes qui empêchent que la méfiance prenne le dessus, qu'elle devienne réciproque et se transforme en force destructrice sous l'effet de processus d'amplification réciproque » (Debru et Isoz, 2020). De nombreuses observations montrent que le sentiment de confiance, nécessaire au bon fonctionnement de la société, ne s'établit pas spontanément, qu'une fois installé il se perd assez facilement, qu'il est beaucoup plus difficile de recréer la confiance car la défiance une fois installée tend à augmenter. La complexité et le caractère dialectique de ces situations sont fort apparentes.

La confiance dans la science

Concernant maintenant la confiance dans les institutions scientifiques, il est patent que la majeure partie de la confiance dans la science est de nature indirecte : confiance dans des chercheurs que l'on ne connaît pas, confiance dans des institutions lointaines et protégées. Le sociologue Gérard Bronner a beaucoup insisté sur le fait que la croissance des connaissances a pour effet paradoxal d'étendre le champ des croyances. Selon lui, les rapports entre connaissance et croyance ne peuvent nullement être perçus « comme un phénomène de vases communicants », l'augmentation de l'une produisant mécaniquement la décroissance de l'autre (Bronner, 2003). Bien avant lui, John Hardwig a introduit l'idée de « dépendance

épistémique » pour caractériser le fait que notre savoir dépend de celui des autres (Bonney et Galinon, 2019). Chez Bronner, il s'agit en premier lieu de la confiance-croyance faite par le scientifique vis-à-vis de la validité des résultats de ses collègues, du fait de l'amoindrissement de sa perception et de sa capacité de jugement sur l'ensemble. Au savoir contrôlé se substitue donc la croyance (Bronner, 2013).

Le récent scandale de la publication dans la revue *The Lancet*, le 22 mai dernier, d'une publication sur l'hydroxychloroquine comme traitement de la COVID-19, suivie d'une rétractation, a suscité le commentaire suivant d'un des auteurs : « Nous ne pouvons plus nous porter garants de la véracité des sources des données primaires » (Bach, 2020).

Le caractère indirect de la confiance dans la science souligné par Gérald Bronner est un facteur de risque non négligeable de perte de confiance. D'où la nécessité d'évaluer les failles du contrôle de qualité de la science, résultant de l'augmentation incessante du nombre de publications, du nombre de scientifiques, et du nombre de journaux.

Cela pose le problème général de la qualité de l'information fournie par les auteurs dans la présentation de leurs résultats et des normes que les journaux scientifiques devraient adopter pour l'acceptation d'un article, les sources d'erreurs d'interprétation étant très nombreuses en sciences de la vie (la norme MIAME -*Minimum Information About a Microarray Experiment*- est un exemple d'énumération des informations nécessaires pour contrôler la fiabilité des interprétations et assurer la reproductibilité des résultats). Au-delà des journaux scientifiques spécialisés eux-mêmes, le problème s'étend au journalisme scientifique qui est fréquemment devenu une espèce de presse à sensation.

De cette manière, la question renouvelée de l'intégrité scientifique, récemment abordée par de nombreuses institutions, devient publique. À cet égard on note la création récente de l'Office français pour l'intégrité scientifique,

placé sous la direction d'Olivier Le Gall, de l'INRAE, ainsi que de nombreux « référents intégrité » dans les institutions liées à la recherche. Il existe plusieurs facteurs limitants, bien identifiés, diminuant l'impact du contrôle de qualité : la pression à la publication rapide, l'évaluation des carrières principalement fondée sur la quantité, l'influence des financements privés en faveur de certaines orientations de recherche. La question des conflits d'intérêt se posant de plus en plus, une déclaration des « liens d'intérêt » par les membres a été récemment mise en œuvre à l'Académie des sciences sous l'impulsion de Pierre Corvol.

Le fait que la confiance dans la science comme institution s'effiloche tient en général à la difficulté de mettre en œuvre les normes épistémologiques de la science expérimentale dans les situations actuelles d'hyperspécialisation et de perception croissante de l'hypercomplexité, particulièrement dans les sciences de la vie. Cette difficulté prend plusieurs formes. Les problèmes de reproductibilité des résultats, avec les désaccords entre scientifiques de différentes spécialités et de différents laboratoires à cultures techniques différentes qui peuvent s'ensuivre, ont suscité l'intérêt de la communauté scientifique ainsi que le prouve un éditorial de la revue *Nature* (2016). Pierre Corvol a remarqué que seulement entre 11 % et 25 % des données en recherche biomédicale pouvaient être reproduites (Corvol, 2019).

Ce sont de tels constats qui l'ont amené à proposer la création de l'Office français de l'intégrité scientifique, création qui a été obtenue. Un autre fait notable qui affecte la crédibilité de la recherche est assez fréquemment observé. Il s'agit de ne publier que les résultats positifs en négligeant les résultats négatifs, surtout dans des domaines de recherche clinique assez peu rigoureuse (Meziani, 2018). Cette situation a suscité la création de la revue *Negative Results* en 2016, puis, plus récemment, de la

revue *Journal of Negative Results in Biomedicine*. Ces lancements, sur le fond de la croissance continue de manquements divers, de fraudes parfois graves, facilitées par la complexité des procédures, sont le signe de la capacité subsistante de la communauté scientifique de s'autoréguler.

La responsabilité des scientifiques est également engagée sur la scène publique en raison d'une certaine porosité entre faits scientifiques et croyances (par définition le domaine de l'inconnu), et en raison du caractère évolutif de la relation entre connu et inconnu (ce qui est fort heureusement de mieux en mieux perçu et accepté à l'occasion de la pandémie actuelle).

Ce qui peut jeter le trouble dans l'esprit public est en outre la confusion fréquente entre la science et la technologie, aussi interdépendantes qu'elles soient, et le fait que les critiques que l'on peut faire à l'égard de la fiabilité de tel ou tel processus industriel finissent par contaminer la science sous-jacente, du moins aux yeux de certains, par un processus de contagion bien connu des sociologues (Sperber, 1996).

Enquêtes sur la confiance dans la science

Le public, au sens large de la population en général, ayant reçu l'éducation assez largement répandue aujourd'hui, n'a ni confiance ni défiance par rapport à la science, mais plutôt ignorance, car la science, dans ses démarches actuelles aussi hypercomplexes que nombre d'activités sociales, reste assez difficile à saisir pour beaucoup, et cela malgré les efforts considérables de diffusion des sciences. De nombreuses enquêtes montrent que les attitudes à l'égard de la science sont très variables selon les milieux ainsi, sans doute, que selon les générations. Certains affirment qu'il existe véritablement une crise de confiance dans « la science » (à prendre peut-être au sens américain de science qui est très

extensif). Les interrogations croissantes à ce sujet ont motivé diverses études. Aux États-Unis, l'*American Academy of Arts and Sciences* a lancé une étude sur la face publique de la science (*The Public Face of Science*) afin d'explorer l'évolution de la relation entre les scientifiques et le public. Il s'avère que la confiance dans la science dépend du niveau des revenus des personnes interrogées, de leur niveau d'éducation et de leurs préférences politiques (les démocrates étant supérieurs aux républicains en la matière).

À noter que les bas revenus ont une moindre confiance dans la science, mais une grande confiance dans l'éducation. La conclusion générale qui en résulte est que la majorité du public a confiance dans la communauté scientifique et pense que la science a un impact positif sur la société. Si cette confiance n'est pas générale, c'est vraisemblablement en raison de la difficulté de saisir la démarche scientifique pour un public plus faiblement éduqué dans le domaine des sciences. Les *National Institutes of Health* pour leur part ont lancé très récemment un forum sur l'internet sur le thème sensible *Science, health, and public trust* (*National Institutes of Health, 2018*).

Dans ce contexte, certaines recommandations ont été élaborées : publier des lignes directrices sur l'intégrité scientifique et sur l'éthique des sciences ; enseigner l'éthique des sciences au niveau universitaire avancé ; également, selon une recommandation de l'*American Academy of Arts and Sciences*, créer ou renforcer les liens entre sciences, humanités et sciences sociales au niveau universitaire. En outre, il est souhaitable d'agir au niveau législatif pour mettre réellement en œuvre de telles dispositions, sans s'interdire de prévoir des pénalités en cas de manquement.

En matière scientifique, la confiance a fréquemment précédé la défiance. Comment la renforcer dans les milieux les plus réfractaires, ceux qui sont la proie du

mécanisme bien connu de l'auto-renforcement des préjugés, surtout des préjugés négatifs ? Les croyances, parfois bien ancrées, interfèrent parfois, et très négativement, avec la connaissance scientifique. On observe une résurgence du créationnisme religieux, qui a certainement un ancrage très fort dans la psyché humaine (Schmid, 2008). On l'observe dans l'esprit de certains jeunes qui sont rendus réfractaires à l'enseignement scientifique qu'ils reçoivent.

Le conflit classique entre sciences et religion se rejoue à de nombreux niveaux. « Faire la preuve de » ne convainc que ceux qui se laissent convaincre. Dans ce contexte, la coupure entre sciences et humanités est très dommageable, car elle se traduit par l'ignorance de l'autre dans chaque camp, par une sorte d'hémianopsie, qui ne favorise pas la compréhension d'ensemble et la mise en perspective du progrès scientifique. Par « mise en perspective » du progrès scientifique, on peut entendre un travail interdisciplinaire, d'une interdisciplinarité nécessairement à large spectre, évitant le risque inhérent à toute entreprise de ce genre d'aboutir à des conclusions trop générales pour être significatives, risque évité par la pratique résolue d'une imprégnation mutuelle des différentes cultures disciplinaires, et par ce que personnellement je désigne comme « épistémologie de terrain », à l'instar de la *Field Philosophy* du philosophe américain Robert Frodeman (2014 ; 2019).

Qu'est-ce qu'innover ? L'exemple de l'édition du génome

Les précédentes considérations ne seraient pas complètes sans une discussion sur l'acceptation de l'innovation et sur le contenu du progrès, et cela pour deux raisons : le fait que l'acceptabilité sociale d'une innovation pose fréquemment question, ce qui implique à nouveau l'universelle question de confiance ; le fait que l'innovation n'est pas toujours

perçue comme un réel progrès. En effet, les termes d'innovation et de progrès ne sont pas équivalents dans leurs significations, attestées dans la langue latine dont ils proviennent. *Innovatio* signifie en premier lieu entrée dans du nouveau, alors que *progressus* signifie en premier lieu marche en avant, et *progressio* signifie en premier lieu progrès comme accroissement. Dans l'usage actuel, innovation est un terme descriptif, alors que progrès, qui a certainement lui aussi une composante descriptive, comporte surtout un jugement de valeur positive. Il s'ensuit que de l'innovation au progrès, il y a un enrichissement en valeur.

On distingue souvent invention et innovation. Selon le dictionnaire *Robert*, innover signifie au premier chef « introduire dans une chose établie quelque chose de nouveau », inventer signifie en premier lieu créer, découvrir, imaginer quelque chose de nouveau. L'invention est imagination, alors que l'innovation s'appuie sur un socle préexistant.

Mais il n'y a pas d'opposition diamétrale entre les deux termes. Pas plus qu'il n'y a d'opposition entre invention et découverte. La distinction sémantique entre invention (du nouveau) et découverte (du préexistant) ne tient pas réellement en science. Comme l'a remarqué le mathématicien Jacques Hadamard dans son *Essai sur la psychologie de l'invention dans le domaine mathématique*, reprenant des remarques d'Henri Poincaré dans sa célèbre conférence *L'invention mathématique*, il existe « quantité d'exemples de résultats scientifiques qui sont des découvertes aussi bien que des inventions » (Hadamard, 1993).

Comment mieux caractériser l'innovation et ses mécanismes ? L'innovation tant scientifique que technique est un processus continu, principalement cumulatif, qui s'appuie sur des succès antérieurs qui en quelque sorte la garantissent. Les révolutions scientifiques, les ruptures

épistémologiques sont moins nombreuses. Elles sont souvent le fruit de progrès dans l'instrumentation scientifique, qui ouvrent fréquent de vastes domaines nouveaux à l'investigation (la lunette de Galilée, la structure de l'ADN, plus récemment la PCR aujourd'hui largement popularisée). L'innovation nourrit la croissance économique, à tel point qu'il y a une véritable injonction d'innover. En économie, l'innovation est considérée naturellement comme telle lorsqu'elle est validée par le marché, lorsqu'elle enrichit le marché en produisant des variations nouvelles sur des réalités préexistantes, qui vont offrir à l'utilisateur un supplément de capacités. Sa définition même implique le passage par le marché. Sinon elle disparaît. Mais son caractère principal est bien qu'elle consiste à élargir l'existant. On parle aussi d'innovation de rupture, semble-t-il plus rare, qui correspond à la création d'un marché radicalement nouveau.

En tout cas, c'est l'élargissement de l'existant qui donne à l'innovation sa consistance et sa base. Elle est de l'ordre du perfectionnement technique, elle s'inscrit dans une durée, alors que l'invention est plus de l'ordre de la rupture, d'une nouveauté importante, sans antécédent. Mais il est certain qu'il existe une grande porosité entre les deux termes, l'innovation présupposant une forme d'invention.

Dans un contexte scientifique très évolutif, il ne suffit pas de consulter les dictionnaires car les dictionnaires consacrent un usage et donc le figent. Énormément de problèmes sont créés par la terminologie. Par exemple, une terminologie au départ simplement descriptive, la terminologie « organismes génétiquement modifiés », qui possède semble-t-il plusieurs définitions distinctes, a fini par véhiculer nombre de connotations négatives dans de nombreux cercles de la société.

On sait à quel point cette terminologie est ancrée dans les esprits. On vérifie à quel point une terminologie établie ne peut pas être

abandonnée sans fortes résistances au profit d'une terminologie plus précise et plus réaliste, ce qui serait pourtant un progrès. Une terminologie n'est pas seulement descriptive, mais également porteuse de valeurs positives ou négatives. Le conservatisme terminologique, créateur de dogmatismes, est un obstacle au progrès scientifique. Il convient de faire évoluer les terminologies pour les rendre plus précises en fonction des connaissances (et ignorances) du moment. Il faut avoir le courage de rendre les vieux concepts obsolètes, car l'histoire des sciences est aussi un cimetière de vieux concepts. Il faut faire très attention aux mots. Comme l'a dit Albert Camus, « mal nommer les choses c'est ajouter au malheur de ce monde » (Camus, 1944). Arrêtons de créer des barrières de mots.

Caractériser comme OGM telle ou telle innovation biotechnologique récente pose problème quant à sa diffusion. L'exemple actuel de la réécriture du génome a été largement discuté dans diverses institutions, notamment à l'Académie d'agriculture, qui a émis un avis (Académie d'agriculture de France, 2020), à l'Académie des sciences, à l'Académie nationale de médecine, à l'Académie des technologies, dans des réunions interacadémiques.

Il reste encore intéressant de revenir sur l'histoire et l'épistémologie de cette technique dite CRISPR-Cas9. En effet, cette technique est une application qui résulte de toute une histoire scientifique antérieure qu'elle poursuit et enrichit, et à l'intérieur de laquelle il est épistémologiquement utile de la réinscrire. C'est une innovation précisément en ce sens, car c'est un perfectionnement important. Cela lui confère une légitimité scientifique complète. Elle s'inscrit dans le cadre de recherches fondamentales en génétique microbienne et virale, sur les mécanismes internes de contrôle des génomes bactériens et sur les génomes viraux, recherches qui ont mené à

la découverte des systèmes CRISPR et Cas avant le perfectionnement apporté par Cas9. Pascale Cossart a fort bien présenté les choses dans son ouvrage *La nouvelle microbiologie. Des microbiotes aux CRISPR* (Cossart, 2006).

On peut en proposer un bref historique. L'expression correspondant à l'acronyme CRISPR (*clustered regularly interspaced short palindromic repeats*), résume la particularité de génomes de procaryotes de contenir des regroupements de courtes séquences d'ADN régulièrement espacées et palindromiques, c'est-à-dire pouvant être lues dans un sens sur un brin de l'ADN et dans le sens opposé sur le brin complémentaire. C'est ce que désigne l'acronyme CRISPR, proposé en 2001 par l'équipe de Francisco Mojica à l'université d'Alicante. On a ensuite découvert que ces clusters de séquences sont associés à d'autres gènes qui codent les protéines dites Cas, qui sont des enzymes, des nucléases.

Puis, en 2005, plusieurs équipes, dont l'équipe espagnole, ont découvert que ces séquences comprennent comme « espaceurs » des séquences virales intégrées au génome bactérien, vraisemblablement à la suite d'infections. Cela suggérerait que ces séquences pourraient être utilisées comme signaux de reconnaissance immunitaire pour combattre les infections ultérieures, donc dans le cadre de l'immunité acquise, ce qui fut confirmé assez rapidement chez le streptocoque. Le système complet fonctionne avec une étape d'ARN transcrits qui servent de guide pour la dégradation de l'ADN viral par les enzymes Cas. Il peut donc être utilisé pour cliver l'ADN cible d'une manière très précise.

Le système a été ensuite amélioré et simplifié par Emmanuelle Charpentier, en plusieurs étapes, insistant d'abord sur le rôle des ARN, puis avec Jennifer Doudna sur le mécanisme d'action de la nucléase Cas9. L'ensemble de ces travaux, qui se poursuivent, aboutit à ce que l'on appelle l'« édition » du génome, le

travail de l'éditeur étant une réécriture. Cette ingénierie génétique repose donc sur un ensemble important de travaux préliminaires, d'observations et d'expériences, qui sont aussi de vraies inventions. Il me semble, vu d'assez loin, que les moments de simplification qui ont eu lieu dans les travaux de Charpentier et Doudna ont une composante d'intuition et d'imagination qui caractérise l'invention. Il s'agit de l'intuition d'un possible. Quant à l'innovation, elle se marque dans le passage à l'application, qui est un test important, épistémologiquement parlant, pour étudier et valider les mécanismes.

À cet égard, la technique de Charpentier et Doudna présente de nombreux avantages qui en facilitent l'application. Cette technique est devenue routinière dans la recherche en laboratoire. Elle est actuellement utilisée ou testée dans de nombreux domaines y compris la médecine. Dans l'ouvrage *Au delà des OGM*, Virginie Tournay rapporte le succès remarquable de l'ingénierie génétique appliquée à l'immunothérapie de cas de leucémies de l'enfant, la technique consistant dans une modification de marqueurs de surface des lymphocytes T par la création de récepteurs antigéniques chimériques (Tournay, 2018). La technique CRISPR-Cas9 est utilisée en recherche génétique sur les leucémies, mais également en essais cliniques. Virginie Tournay s'est étonnée du fait que des réussites existantes dans ce domaine n'aient reçu aucun écho médiatique. Sans doute est-il plus aisé d'agiter la peur du risque que de saluer des réussites technologiques, fussent-elles médicales – un jugement philosophique dont l'auteur de ces lignes assume la responsabilité.

Recherche fondamentale et recherche appliquée

La généralisation de ces techniques pose

cependant la question de leur application à l'embryon dans un esprit d'eugénisme, et non plus seulement au niveau somatique. La question de l'eugénisme ne cesse de se poser et se reposera d'une façon croissante. En novembre 2018, l'Académie des sciences et l'Académie nationale de médecine ont condamné l'initiative d'un chercheur chinois qui avait fait beaucoup de bruit en utilisant la technique CRISPR-Cas9 pour induire une mutation du gène CCR5. Ce gène code le récepteur à chimiokine qui permet au VIH de rentrer dans les cellules hôtes. Des mutations de ce gène qui existent naturellement se traduisent par une protection de leur porteur vis-à-vis du VIH. Induire artificiellement sa mutation a permis de déjouer l'infection par le VIH, ce qui a donné naissance à des bébés modifiés.

Dans leur déclaration commune, les deux instances écrivent : « Dans l'état actuel des connaissances, les conditions ne sont pas réunies pour ouvrir la voie à la naissance d'enfants dont le génome a été modifié à l'état embryonnaire. Si cette démarche était entreprise dans l'avenir ce ne devrait l'être qu'après approbation du projet par les instances académiques et éthiques concernées et un débat public approfondi. L'Académie nationale de médecine et l'Académie des sciences tiennent néanmoins à réaffirmer l'importance pour l'être humain des recherches responsables faisant appel aux technologies modifiant l'ADN, y compris quand elles sont menées dans l'embryon, et leur apportent leur soutien » (Académie des sciences, 2018). Recherche responsable, principe de responsabilité, être capable de répondre de ses actes, mais ne pas fermer entièrement la porte, tel est l'essentiel de ce message.

Il semble bien qu'il y ait un lien fort, un lien vital entre recherche fondamentale et recherche appliquée, peut-être surtout dans les sciences du vivant. Il me semble que ce lien vital est une idée à promouvoir, car il procure une double légitimité. Le chimiste

Didier Roux, titulaire de la Chaire d'innovation technologique Liliane Bettencourt du Collège de France, et qui a fait auparavant une carrière industrielle en particulier chez Saint-Gobain dans la recherche sur les verres, insistait sur le nombre d'inconnues qui subsistent dans la connaissance fondamentale des verres (Roux, 2018). Cela implique la nécessité de ne pas tarir la recherche fondamentale dans son dialogue avec la recherche appliquée. La recherche fondamentale ne peut pas se poursuivre jusqu'au bout si elle n'est pas soumise à application, confrontée à l'application. De la recherche à l'application, il y a un continuum expérimental qui fonctionne nécessairement dans les deux sens. En médecine, la recherche dite « translationnelle » consiste à développer rapidement l'application et donc les leçons que l'on peut tirer de l'application pour la recherche fondamentale. Il y a une relation bidirectionnelle entre le domaine fondamental et le domaine clinique. La frontière entre les deux, frontière largement verbale, devient floue.

La question de la preuve de risques

Je voudrais maintenant passer très brièvement de la question de l'application à la question de la preuve d'un risque, déplacement bien naturel dans notre argumentation en faveur de la confiance. Une idée fréquemment mise en avant est que l'absence de preuve n'est pas la preuve d'une absence. L'absence de preuve de la toxicité d'un produit ne serait pas la preuve d'une absence de toxicité. Donc la présence d'une toxicité devrait être considérée à titre d'hypothèse, et par suite permettre la mise en jeu du principe de précaution. Cette attitude est loin de faire l'unanimité. D'une part, il y a beaucoup d'exemples dans l'histoire de la médecine et dans la pratique médicale qui en montrent le bien-

fondé. Fréquemment on a trop vite cru qu'il n'y avait rien de grave parce que l'on n'avait pas pu ou su ou voulu observer ce qu'il y avait de grave. Mais d'autre part, notons qu'il s'agit de preuve, et que l'absence de preuve de toxicité ne peut être considérée symétriquement comme une présomption de toxicité.

S'il s'agit de déterminer à qui revient la charge de la preuve (problème fréquemment évoqué), je remarquerai simplement que prouver la toxicité ou prouver la non-toxicité est fondamentalement la même recherche. Il serait rationnel d'en conclure que cet adage, pris au pied de la lettre, encourage la recherche de preuve, donc la recherche tout court. Il ne devrait donc pas être utilisé comme un frein.

Enfin on est en droit d'interroger sa formulation ainsi que son fondement logique. Dans l'ouvrage *Au-delà des OGM*, Brigitte Laquière qualifie cette assertion de sentence magique qui laisse perplexe (Regnault-Roger et al., 2018). La perplexité exprimée par Brigitte Laquière peut être partagée pour deux raisons. La première est que la structure rhétorique de la phrase est ce qui lui confère la magie, et donc l'apparence séduisante d'une rationalité. Mais cet effet purement rhétorique ne correspond à rien sur le plan de la logique.

À l'appui de cette thèse peut être cité le travail d'un philosophe américain, Steven D. Hales, publié dans la revue *Think* en 2005 et qui s'intitule *Thinking Tools: You Can Prove a Negative* (Hales, 2005). Aucun logicien, déclare Steven Hales, ne considère que l'on ne peut pas prouver une proposition négative. On peut prouver une non-existence. En général, les preuves d'absence reposent sur la validité du principe d'induction, largement confirmée sur le plan pragmatique. Certes, la mise en œuvre du principe d'induction doit être aussi complète que possible, ce qui peut prendre un temps parfois fort long pendant lequel se pose le problème de savoir quelle attitude prendre par rapport à la substance en

cours d'étude. La conclusion que j'en retire personnellement est d'étudier plutôt que de bannir d'entrée de jeu, de rechercher la preuve.

Progrès des sciences, progrès des sociétés

Toute innovation constitue-t-elle un progrès ? Le progrès scientifique et le progrès social vont-ils de pair ? Qu'en est-il de la perception du progrès ? Dans un texte remarquable intitulé *La décadence de l'idée de progrès*, en 1987, le philosophe-médecin Georges Canguilhem a mis en perspective l'idée de progrès, tant par rapport à l'histoire des sciences qu'à celle des sociétés. Canguilhem confronte les idées, les espoirs et les peurs de Condorcet, dans son *Esquisse d'un tableau historique des progrès de l'esprit humain* en 1793, aux réalités d'une histoire rythmée de crises et de régressions, de cycles. Il montre d'abord comment cette idée de progrès comporte alors une notion de linéarité et un caractère indéfini. Il s'agit ensuite pour lui d'examiner « les conditions dans lesquelles une idée a perdu son prestige et son rôle » (Canguilhem, 2018).

Acteur majeur de la philosophie française du XX^e siècle, résistant, Canguilhem ne peut qu'observer l'alternance de progrès et de régressions dans l'histoire. Depuis ses analyses, la conjoncture scientifique, médicale, agronomique a beaucoup changé, et la perception nouvelle de l'hypercomplexité de tout ce qui concerne le vivant aussi bien que la société ouvre beaucoup plus de possibilités sur les plans tant théorique que pratique. Le progrès dans les sciences et le progrès dans la société vont-ils alors de pair ?

Cette vaste question a été abordée lors d'une conférence de l'Académie européenne des sciences à l'Académie royale de Belgique à Bruxelles en novembre 2016 et

publiée sous le titre *Progress in Science Progress in Society*. J'en extrairai deux jugements. En premier lieu, celui de Catherine Bréchignac se demandant si le progrès dans la science est un progrès pour la société. Elle remarque que « la société embrasse la technologie, non la science. Ce sont principalement les résultats de la technologie qui intéressent la société » (Bréchignac, 2018).

En second lieu, celui de François Guinot, de l'Académie des technologies, qui examine l'innovation technologique comme facteur de pénétration de la science dans la société. Son idée est que l'innovation technologique accélérée a pour effet de « cacher » la science qui est derrière (Guinot, 2018). C'est dommageable d'un point de vue sociétal pour la science. En outre, on assiste à une « technologie exponentielle ». Ceci crée une désynchronisation entre la sphère scientifique et technique et la capacité d'adaptation cognitive dans la société, ce qui ne cesse de créer de nouvelles distorsions, de nouvelles anxiétés, et de compliquer les problèmes politiques.

Deux conséquences

Que conclure d'une manière utilisable de ces considérations ? En premier lieu, on ne peut séparer, épistémologiquement parlant, la recherche de l'application, ce qui légitime l'application du point de vue de la recherche. Cet argument n'est pas négligeable. Il conviendrait qu'il soit entendu. Du point de vue de la « société » (un terme vague qui dans l'idiome des scientifiques désigne tout ce qui n'est pas la science), l'affaire est rarement entendue. À cet égard, dans un pays qui a institué l'esprit critique comme une qualité cardinale, la recherche d'un consensus ménageant sans cesse la chèvre et le chou pourrait peut-être s'accommoder d'un peu de dissensus philosophique par rapport aux opinions dominantes.

Une deuxième conclusion concerne le journalisme et les media. Dans une société où le soupçon prend de plus en plus d'importance et où la notion de vérité scientifique perd de son attrait au profit d'un relativisme de bas étage consacrant le règne d'opinions aussi différentes que, par définition, équivalentes, le rôle des media est devenu critique. Dans le rapport du Comité consultatif national d'éthique en 1984, le neuropharmacologue Jacques Glowinski, écrivait : « Les journalistes font un très dur métier, mais un très beau métier, il faudrait qu'ils le fassent mieux encore qu'ils ne le font maintenant. (...) Leur rôle est prédominant. Je pense qu'il faut absolument améliorer la manière dont ils travaillent » (Glowinski, 1985).

Le poison du doute, l'imprécision, l'esprit de parti pris sont trop fréquemment observés dans les grands media. À cet égard, il conviendrait de relancer l'idée quelque peu explosive de créer un Comité national d'éthique de l'information et de la communication, une idée de régulation parfois proposée ailleurs (Poullet, 2018). Cela permettrait peut-être de mieux conjuguer la liberté et la responsabilité, deux valeurs qui n'ont de sens que réunies. La responsabilité des scientifiques est souvent évoquée, parfois montrée du doigt. La responsabilité médiatique l'est beaucoup moins. La création d'une instance régulatrice dotée de pouvoirs renforcés permettrait aussi, sans nul doute, de mieux faire de l'innovation un progrès pour tous, et par là de restaurer une confiance que chaque nouvel événement, contingent ou imprévu, ébrèche.

L'auteur remercie Marie-Françoise Chevallier - Le Guyader, Jean-Claude Mounolou et Agnès Ricroch pour leurs invitations à traiter les sujets présentés dans l'article.

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Opinion

Références

- Académie d'agriculture de France. 2020. *Réécriture du génome, éthique et confiance*, Avis de l'Académie d'agriculture de France, 8 janvier 2020. <https://www.academie-agriculture.fr/publications/publications-academie/avis>.
- Académie des sciences. 2018. *Bébés génétiquement modifiés : l'Académie des sciences et l'Académie nationale de médecine condamnent l'initiative du Dr. He Jiankui*, déclaration du 28 novembre 2018. In *Rapports, ouvrages, avis et recommandations de l'Académie des sciences*, site internet de l'Académie.
- Bach JF. 2020. Toute les quinze secondes, une nouvelle publication scientifique est disponible sur internet. *Le Figaro*, samedi 13 – dimanche 14 juin 2020.
- Benveniste E. 1960. Créance et croyance. In *Le vocabulaire des institutions indo-européennes, t. I : Economie, parenté, société*, Editions de Minuit, Paris, 171.
- Berthoz A. 2009. *La simplicité*, Odile Jacob, Paris.
- Bonnay D, Galinon H. 2019. *Épistémologie sociale*, Vrin, Paris.
- Bréchnignac B. 2018. *Is Progress in Science, Progress for Society ?*, In Tressaud A (ed) *Progress in Science, Progress in Society*, Springer International Publishing AG, 4.
- Bronner G. 2003. *L'empire des croyances*, Presses universitaires de France, Paris, 165.
- Bronner G. 2013. Comment Internet fait le lit des croyances, *Pour la Science*, 426 (5), 32.
- Canguilhem G. 2018. La décadence de l'idée de progrès. In Canguilhem G. *Œuvres complètes*, tome V, *Histoire des sciences, épistémologie, commémorations 1966-1995* (presentation Limoges C), Vrin, Paris, 1993.
- Chevallier-Le Guyader MF. 2020. *Science et confiance: un contexte évolutif, une question renouvelée*. In Dron M et Kim-Bondled P (eds), *Covid-19 et agriculture. Une opportunité pour la transition agricole et alimentaire ?*, Presse des Mines, 2020, 311-319.
- Corvol P. 2019. *Science et communication : Open, Prospective en science ouverte*, Colloque de l'Académie des sciences, 2 avril 2019.
- Cossart P. 2006. *La nouvelle microbiologie. Des microbiotes aux CRISPR*, Odile Jacob, Paris, ch 4.
- Debru C, Isoz FP. 2020. *Pourquoi croyons-nous ? Dialogue en liberté d'un philosophe et d'un psychanalyste*, Odile Jacob, Paris, 182-185.
- Frodeman R. 2014. *Sustainable Knowledge : a Theory of Interdisciplinarity*, MacMillan Palgrave.
- Frodeman R. 2019. *Pour un savoir soutenable. Une théorie de l'interdisciplinarité* (trad Galmot A), Quae-NSS Dialogues, Paris.
- Glowinski J. 1985. « Exposé », *Problèmes éthiques posés par la recherche sur le cerveau humain*, Comité consultatif national d'éthique pour les sciences de la vie et de la santé, La documentation française, Paris, 1985.
- Guinot F. 2018. *Technological Innovation as a Factor of Penetration of Science in Society*. In Tressaud A (ed) *Progress in Science, Progress in Society*, Springer International Publishing AG, 81.
- Hadamard J. 1993. *Essai sur la psychologie de l'invention dans le domaine mathématique*, Jacques Gabay, Paris.

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Opinion

- Hales SD. 2005. *Thinking Tools : You can prove a negative, Think*, 4(10), 109 – 112.
- Luhmann N. 2006. *La Confiance. Un mécanisme de réduction de la complexité sociale* (trad Bouchard S), Economica, Paris.
- Luhmann N. 2017. *Systemtheorie der Gesellschaft*, Suhrkamp, Berlin.
- Marzano M. 2010. Qu'est-ce que la confiance ?, *Études*, 412, 53-63.
- Meziani A. 2018. *La fabrique du chercheur ou la fabrique de l'imposteur*, Mémoire de M1, Espace Ethique Île-de-France, Université Paris-Saclay.
- Schmid AF (ed). 2008. Dossier *Evolution et créationnisme*, Natures Sciences Sociétés, 15(4).
- National Institutes of Health. 2018. *About Science, Health and Public Trust*, <https://www.nih.gov/about-nih/what-we-do/science-health-public-trust>
- Nature. 2016. *Reality check on reproducibility*, *Nature*, 533 (7604), 437.
- Poincaré H. 1993. *L'invention mathématique*, Jacques Gabay, Paris, 9.
- Poulet Y. 2018. *Law Facing Information and Communication Technology (ICT) - Conflict or Alliance*. In Tressaud A (ed) *Progress in Science, Progress in Society*, Springer International Publishing AG, 91.
- Quéré L. 2001, *La structure cognitive et normative de la confiance*, *Réseaux*, 4(108), 125-152.
- Quéré L. 2005. *La structure cognitive de la confiance*, HAL 00003878.
- Raude J. 2020. Vaccination : une hésitation française, *The Conversation*, entretien du 2 décembre 2020.
- Regnault-Roger C, Houdebine LM, Ricoch A (eds). 2018, *Au-delà des OGM. Science-Innovation-Société*, Presses des Mines, Paris, 42.
- Roux D. 2018. *Rencontre avec Didier Roux – Découverte, invention, innovation technologique*, 5 à 7, Cycle rencontre avec un académicien, 22 mai 2018. In Séances publiques de l'Académie des sciences, <https://www.academie-sciences.fr/fr/Seances-publiques/5a7-didier-roux-2018.html>.
- Simmel G. 1999. *Secret et sociétés secrètes* (trad Muller S), Circé, Strasbourg, 22.
- Simmel G. 1999. *Sociologie. Études sur les formes de la socialisation* (1908), Presses universitaires de France, Paris.
- Simmel G. 2014. *Philosophie de l'argent* (1900) (trad Cornile S et Ivernel P), Presses universitaires de France, Paris.
- Sperber D. 1996. *La contagion des idées*, Odile Jacob, Paris.
- Tiran A. 1997. *Confiance sociale confiance primordiale, en parlant de Georg Simmel*. In Bernoux P et Servet JM (eds), *La construction sociale de la confiance*, AEF, Montchrestien, 486.
- Tournay V. 2018. *Mesurer scientifiquement l'acceptabilité sociale des biotechnologies : une exigence éthique et politique*. In Regnault-Roger C, Houdebine LM et Ricoch A (eds), *Au-delà des OGM. Science-Innovation-Société*, Presses des Mines, Paris, 63.

Édité par

Nicole Mathieu, directrice de recherche émérite au CNRS, membre de l'Académie d'agriculture de France.

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Opinion

Rapporteurs

Dominique Job, directeur de recherche émérite au CNRS, membre de l'Académie d'agriculture de France.

Juliette Simont, philosophe, maître de recherche FNRS, enseignante à l'Université libre de Bruxelles.

Rubrique

Cet article a été publié dans la rubrique «Opinions» des *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France*.

Reçu

21 janvier 2021

Accepté

29 mars 2021

Publié

17 avril 2021

Citation

Debru C. 2021. Confiance, innovation, progrès, *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF)*, 11(4), 1-14. <https://doi.org/10.58630/pubac.not.a174557>.



Claude Debru est membre de l'Académie d'agriculture de France et professeur émérite de philosophie des sciences au Centre d'archives en philosophie, histoire et édition des sciences (UMS 3610 CNRS / École normale supérieure).

Retour sur la définition d'un OGM en amélioration des plantes. Points de vue génétique et réglementaire

Review of the definition of a GMO in plant breeding. Genetic and regulatory points of view

André Gallais¹

¹ UMR Génétique quantitative et évolution, INRAE-UPS-CNRS

Correspondance :
Ferme du Moulon, 91190 Gif-sur-Yvette
andre.gallais@inrae.fr

Résumé

Au début de la terminologie OGM, OGM ou « organisme génétiquement modifié » signifie organisme obtenu par transgénèse¹. Mais avec le développement de la réglementation pour la commercialisation des variétés OGM, le sens d'OGM a été élargi. Dans la directive européenne 2001/18, un OGM est un organisme dont le matériel génétique a été modifié d'une manière qui ne s'effectue pas naturellement. Le problème avec cette directive est de savoir parmi les outils utilisés par le sélectionneur quels sont ceux qui

conduisent à modifier de façon non naturelle le matériel génétique. De plus, des modifications génétiques importantes du génome comme la juxtaposition de génomes élémentaires correspondant à la création de nouvelles espèces et le doublement du nombre chromosomique ne sont pas considérées comme conduisant à des OGM. Une nouvelle définition d'une plante OGM est alors proposée pour recouvrir ces situations : c'est une plante dont les gènes ou les génomes nucléaires ou cytoplasmiques ont été modifiés intentionnellement par l'intervention de l'Homme. Cette définition permet de recouvrir toutes les modifications de la séquence d'ADN des gènes et de la structure des génomes réalisées par le sélectionneur. Au niveau de la réglementation, en restant dans l'esprit de la directive 2001/18, il suffirait alors de préciser les techniques d'obtention conduisant à des OGM qui seraient

¹ Deux graphies sont acceptées : « transgénèse » et « transgenèse », mais, ici, on suit les recommandations du Ministère de la culture (<http://www.culture.fr/franceterme>) et de la Commission de terminologie et de néologie (Journal officiel du 14/9/1990 et du 22/9/2000 : <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGIARTI000006538739/1990-09-26/#LEGIARTI000006538739>).

exemptées et celles conduisant à des OGM relevant de la réglementation. Autrement dit, parmi tous les OGM, il y aurait des OGM non réglementés et des OGM réglementés.

Abstract

At the beginning of the terminology GMO, GMO or Genetically Modified Organism means organism derived by transgenesis. However, with the development of regulations for the marketing of GMO varieties, the meaning of GMOs has been broadened. According to the 2001/18 European Directive, a GMO is an organism whose genetic material has been modified in a manner that is not natural. The problem with this directive is to know among the tools used by the breeder which ones lead to non natural changes in genetic material. In addition, important genetic changes in the genome such as the juxtaposition of elementary genomes corresponding to the creation of new species and the doubling of the chromosome number are not considered as leading to GMOs. A new definition of a GMO plant is then proposed to cover these situations: it is a plant whose nuclear or cytoplasmic genes or genomes have been intentionally modified by human intervention. This definition covers all changes in gene DNA sequence and genome structure made by the breeder. At the regulatory level, remaining in the spirit of the 2001/18 directive, it would be sufficient to specify the techniques leading to GMOs that are exempted and those leading to GMOs under regulation. In other words, among all GMOs, there would be unregulated GMOs and regulated GMOs.

Mots clés

OGM, définition, réglementation

Keywords

GMO, definition, regulation

L'origine de la terminologie OGM

L'origine de la terminologie OGM ou « organisme génétiquement modifié » remonte à la conférence d'Asilomar en 1975, la première conférence internationale sur la sécurité des modifications génétiques, suite aux travaux de Paul Berg (1972) sur le transfert de séquences codantes d'ADN d'une bactérie dans l'ADN d'un virus (Jackson *et al.*, 1972). Il s'agissait de mettre en place un moratoire sur les manipulations génétiques chez les micro-organismes, afin d'éviter une dispersion dans l'environnement des bactéries génétiquement modifiées.

À cette conférence, la communauté scientifique parle de *genetically engineered organisms*. La terminologie OGM, en anglais GMO, pour *genetically modified organisms*, est apparue plus tard, dans les années 1985, avec le développement de la transgénèse chez différents organismes supérieurs, plantes et animaux. OGM signifie alors organisme obtenu par transgénèse, c'est-à-dire par le transfert dans son génome, par des moyens hors de la reproduction sexuée, d'un ou plusieurs gènes d'une autre espèce qui peut être très éloignée, voire d'un genre et même d'un règne différent ; il peut aussi s'agir d'un gène de la même espèce, auquel cas on parle plutôt de cisgénèse (Gallais et Ricroch, 2005).

Prise à la lettre, la terminologie OGM est malheureuse, car, en amélioration des plantes, toute variété présentant un nouveau caractère peut être considérée comme le résultat de modifications génétiques du matériel de départ. Cependant cette terminologie est entrée dans l'usage, avec un sens plus large que la seule modification des génomes par transgénèse. Il faut donc bien en préciser et en limiter le sens, afin d'éviter des confusions, notamment entre ce qu'est un OGM soumis à la réglementation et ce qu'est un OGM du point de vue

génétique. En conservant à la notion d'OGM son sens génétique, nous verrons qu'il y a des OGM non réglementés ou qui doivent être exclus ou exemptés (selon le choix du législateur) de la réglementation.

Les OGM selon la directive européenne 2001/18/EU et le Protocole de Carthagène

Dès les années 1990, avec une réglementation européenne sur les OGM, est apparue une définition plus large des OGM, valable des micro-organismes aux organismes supérieurs, plantes et animaux. Ainsi la directive européenne 90/220, puis la directive 2001/18/EU, ont défini un OGM comme « un organisme, à l'exception des êtres humains, dont le matériel génétique a été modifié d'une manière qui ne s'effectue pas naturellement par multiplication et/ou par recombinaison naturelle ». Puis, à partir de cette définition génétique d'un OGM, la directive précise les techniques qui conduisent à des OGM relevant de la réglementation.

D'abord, chez les plantes, par son annexe 17, la directive 2001/18 écarte du champ de la réglementation, « les techniques de modifications génétiques qui ont été traditionnellement utilisées pour diverses applications et dont la sécurité est avérée depuis longtemps », mais sans en donner la liste. Selon le service scientifique de la Commission européenne (*Scientific Advice Mechanism*, SAM) et l'Agence européenne de sécurité sanitaire des aliments (*European Food Safety Authority*, Efsa), en ce qui concerne les plantes, les croisements interspécifiques et le doublement chromosomique sont clairement écartés.

Puis, après avoir donné sa définition d'un OGM, la directive précise dans l'annexe IA 1^{ère} partie les techniques qui conduisent à des OGM (dont la transgénèse et la fusion de cellules entre espèces éloignées), et, dans l'annexe IA 2^{ème} partie, elle donne les

techniques qui ne sont pas considérées comme entraînant une modification génétique réglementée (la fécondation *in vitro*, l'induction polyploïde). Dans l'annexe IB, elle cite les techniques de modification génétique à exclure du champ de la directive (la mutagénèse et la fusion cellulaire entre espèces proches), qui sont donc reconnues comme générant des OGM, mais non réglementés.

Dans la définition donnée par la directive, la référence au naturel avec l'expression « d'une manière qui ne s'effectue pas naturellement » pose le problème de définir ce qui est naturel et ce qui ne l'est pas. En effet, on peut remarquer que toutes ou la plupart des techniques biologiques utilisées reposent sur des phénomènes qui se produisent ou se sont produits dans la nature. C'est le cas notamment de la transgénèse (Gallais et Ricroch, 2005), de la fusion de cellules d'espèces différentes (Fuentes *et al.*, 2014) et des techniques de modification du génome en des points précis (on parle d'édition génomique) (Doudna et Charpentier, 2014). La différence essentielle entre la mise en œuvre de ces techniques dans les méthodes de sélection et ce qui se produit dans la nature est l'intervention de l'Homme pour maîtriser les phénomènes en cause et si cela conduit à un nouveau patrimoine génétique pour un organisme, celui-ci est un OGM. Au niveau des résultats obtenus, on peut aussi parler de modifications génétiques intentionnelles.

Une autre définition d'un OGM, en fait d'un OVM, ou organisme vivant modifié, a été donnée par le Protocole de Carthagène, en 2000. Selon cette définition « un organisme vivant modifié est un organisme contenant des combinaisons de matériel génétique inédites et obtenues par recours aux techniques de la biotechnologie moderne ». La définition précise les techniques dites « modernes » conduisant à des OVM : (1) « les techniques appliquées *in vitro* aux

acides nucléiques, y compris l'acide désoxyribonucléique (ADN) et l'introduction directe d'acides nucléiques dans des cellules ou organites », (2) « la fusion de cellules d'organismes n'appartenant pas à une même famille taxonomique, qui surmonte les barrières naturelles de la reproduction ». Cette définition recouvre essentiellement : la modification des génomes avec le transfert de gènes (nucléaires ou cytoplasmiques) dans un génome, la modification des gènes et certaines fusions cellulaires. Elle est donc plus restreinte que celle de la directive 2001/18.

Chez les plantes il existe des OGM écartés par la directive européenne et le Protocole de Carthagène

Des modifications profondes de l'organisation et du fonctionnement des génomes sont écartées d'entrée par la définition de la directive européenne, car considérées comme des modifications obtenues par des outils « traditionnellement utilisés » ; ces mêmes modifications sont aussi écartées par la définition du Protocole de Carthagène, car ne faisant pas appel aux « biotechnologies modernes ». Il s'agit principalement de la création de nouveaux génomes par hybridation interspécifique, de la modification du niveau de ploïdie et des translocations de fragments chromosomiques d'une espèce assez éloignée.

Ainsi, dans les deux définitions, les nouvelles espèces de plantes, créées par l'Homme, ne sont pas considérées comme des OGM. Pourtant, quoi de plus artificiel que les espèces synthétiques, obtenues par croisement interspécifique comme le *Triticale* (croisement blé x seigle) (Charrier et Bernard, 1981) et le *Tritordeum* (croisement blé dur x orge du Chili) (Martin *et al.*, 1999) ? Elles ne se sont pas produites dans la nature (le blé peut se croiser naturellement avec le seigle,

et plus difficilement avec l'orge, mais, dans les deux cas, sans doublement chromosomique, les plantes obtenues sont stériles), et le génome de ces nouvelles espèces résulte alors de la juxtaposition de deux génomes assez différenciés, ce qui entraîne de nombreuses nouvelles interactions entre gènes, d'où bien plus de modifications des caractères génétiques que la simple introduction d'un gène dans un génotype par transgénèse. De plus, on ne comprend pas pourquoi, selon la directive 2001/18, une nouvelle espèce obtenue par des croisements interspécifiques n'est pas un OGM, alors qu'elle l'est par fusion de protoplastes (cellules débarrassées de leur paroi celluloseuses). Il n'y a en effet pas lieu de distinguer deux modes d'obtention de génomes qui conduisent au même résultat.

Un autre exemple de modification profonde des génomes, écartée par les deux définitions, est la modification du niveau de ploïdie, qui a des conséquences importantes sur la méiose et l'effet des gènes. Certes, le doublement du nombre chromosomique peut se produire dans la nature, mais il n'est pas très fréquent, et il se produit selon un autre mécanisme, par production de gamètes non réduits (donc à nombre double de chromosomes) (Ramsey et Schemske, 1998). Ainsi la pastèque presque sans pépins, très appréciée du consommateur, qui est triploïde (c'est-à-dire avec trois fois le génome de base, car obtenue par croisement d'un parent diploïde avec un parent autotétraploïde dérivé par doublement chromosomique d'un autre parent diploïde), ce qui conduit à une méiose anormale et une quasi-stérilité, n'est-elle pas un OGM ?

La modification du niveau de ploïdie, qui est une modification génétique importante du génome, n'affecte pas les gènes eux-mêmes, mais leur régulation ou leur expression. Ainsi, chez une plante autotétraploïde (avec quatre fois le génome de base) avec deux allèles A et a à un locus,

un allèle *A* a un effet différent selon le nombre de *A* présents : un (*Aaaa*), deux (*AAaa*), trois (*AAAa*) ou quatre (*AAAA*). Avec des modifications de taille des cellules, il en résulte des modifications de nombreux caractères (par exemple, les feuilles sont plus longues, les tiges sont moins ramifiées, etc.) qui justifient l'utilisation du doublement chromosomique en amélioration des plantes, notamment chez les graminées fourragères, comme source de nouvelle variabilité génétique permettant d'augmenter la digestibilité des fourrages (Gallais, 2003 ; 2013). Ces modifications du génome doivent donc être couvertes par la définition génétique d'un OGM. À noter d'ailleurs qu'au début du XX^e siècle, avec les travaux du généticien de Vries (1909), le doublement du nombre chromosomique, comme tous les remaniements chromosomiques (translocations, inversions de segments chromosomiques), était considéré comme une mutation.

On peut aussi noter des modifications profondes du génome du blé tendre, non considérées comme des OGM par la directive 2001/18, obtenues par ingénierie cytogénétique conduisant à des remplacements de longs segments (bras de chromosomes) du blé tendre, par des segments de chromosomes plus ou moins différenciés (dits homéologues) d'espèces plus ou moins apparentées ; on parle alors de translocations de fragments chromosomiques (Jahier, 1982 ; 2010). Ainsi, chez certaines variétés européennes de blé tendre, un long segment d'un chromosome de leur génome est en fait un segment homéologue d'un chromosome du seigle. Or, comme signalé précédemment, le blé et le seigle ne donnent pas des descendants fertiles ; un tel phénomène a donc très peu de chance de se produire naturellement. À noter que la structure allopolyploïde du génome du blé tendre (juxtaposition de trois génomes élémentaires homéologues) est favorable pour de tels remaniements.

De même, le cas du géniteur de départ de la variété de blé tendre « Renan » est intéressant à signaler. Ce géniteur a été obtenu par le transfert de gènes d'*Aegilops ventricosa*, espèce assez éloignée du blé tendre, par l'intermédiaire d'une espèce « pont », le blé dur qui peut se croiser avec les deux espèces (Maïa, 1967). Le séquençage du génome de ce géniteur montre, en position télomérique (à l'extrémité du chromosome), une translocation homéologue d'un bloc chromosomique (10 % du bras chromosomique) d'*Aegilops ventricosa* qui porte la résistance à trois différentes races de rouilles et une résistance aux nématodes (Gao *et al.*, 2021). Pour la résistance au piétin verse, localisée sur un autre chromosome, et aussi héritée d'*Aegilops ventricosa*, les résultats du séquençage du génome sont encore en cours d'interprétation dans l'UMR GDEC INRAE de Clermont-Ferrand pour voir s'il s'agit d'une translocation homéologue ou d'une simple recombinaison à la méiose entre chromosomes plus ou moins homologues. Les premières interprétations sont en faveur là aussi d'une translocation en position télomérique (Choulet, 2021). Ces cas de translocations de fragments chromosomiques d'espèces assez éloignées doivent être considérés comme des OGM sur le plan génétique. D'ailleurs, l'éloignement génétique de l'espèce donneuse du segment chromosomique entraîne l'absence de crossing-overs dans ce segment chez les plantes hétérozygotes pour ce segment du fait de sa différenciation. Dans le cas de la variété de blé « Renan », pour le segment chromosomique portant la résistance au piétin verse issue d'*Aegilops ventricosa*, s'il s'agissait simplement de l'introduction d'un nouvel allèle à un locus du blé tendre, compte tenu du mode de transfert qui ne peut pas se produire naturellement, le résultat devrait être encore considéré comme un OGM (Gallais, 2021).

Une nouvelle définition d'un OGM pour les plantes, plus précise

En gardant le point de vue génétique de la directive européenne et de la définition du Protocole de Carthagène, afin d'avoir plus de cohérence dans ce qui est reconnu OGM et ce qui ne l'est pas et couvrir les cas précédents de modifications du génome nucléaire, il serait préférable de définir simplement un OGM en amélioration des plantes comme « une plante dont les gènes ou les génomes nucléaires ou cytoplasmiques ont été modifiés intentionnellement par l'intervention de l'Homme ».

Dans cette définition, ce qui est important, c'est l'intervention de l'Homme pour une modification intentionnelle de la séquence d'ADN des gènes ou de la structure des génomes, en y incluant la création de nouveaux génomes. Cette définition couvre sans ambiguïté tous les cas de modifications possibles de la séquence

d'ADN des gènes ou de la structure des génomes (Tableau 1).

La modification de la séquence d'ADN des gènes concerne la mutagenèse (aléatoire ou ciblée) au niveau des gènes nucléaires et cytoplasmiques (des chloroplastes et des mitochondries). La modification des associations d'allèles présents aux différents locus par recombinaison génétique à la méiose et sélection est exclue de cette définition, car il n'y a ni modification de la séquence d'ADN des gènes eux-mêmes, ni modification du génome. Par génome nucléaire, il faut comprendre l'ensemble structuré des locus d'un individu (l'ensemble des chromosomes) d'une espèce ; c'est l'ensemble possible des sites pour les gènes ; il recouvre donc l'ensemble des locus, et aussi le niveau de ploïdie. À partir de cette définition, plusieurs types de modifications des génomes nucléaires peuvent être envisagés. L'insertion d'un gène supplémentaire dans un génome quelle que

Tableau 1. Techniques ou types de modifications des gènes et des génomes conduisant à des OGM, selon la définition proposée. Voir la signification de SDN1, SDN2 et SDN3 dans le texte.

Unités génétiques modifiées	Technique ou type de modification
Gènes	<ul style="list-style-type: none"> - mutagenèse aléatoire* - mutagenèse dirigée* (SDN1*, <i>base editing</i>*), - substitution de séquences homologues* (SDN2*) - modification des gènes cytoplasmiques*
Génomes	<ul style="list-style-type: none"> - transgénèse, SDN3 (gène étranger) - cisgénèse*, SDN3 (gène de l'espèce)* - translocations de fragments chromosomiques* - synthèse partielle du génome nucléaire - modification du niveau de ploïdie* - création de nouveaux génomes nucléaires par croisements interspécifiques ou fusion de protoplastes (1) entre espèces proches*, (2) entre espèces éloignées - modifications des génomes cytoplasmiques* - nouvelles associations génome nucléaire x génomes cytoplasmiques*

* en conservant l'esprit de la directive 2001/18, il est proposé que ces techniques ou types de modifications soient exclues de la réglementation (voir texte).

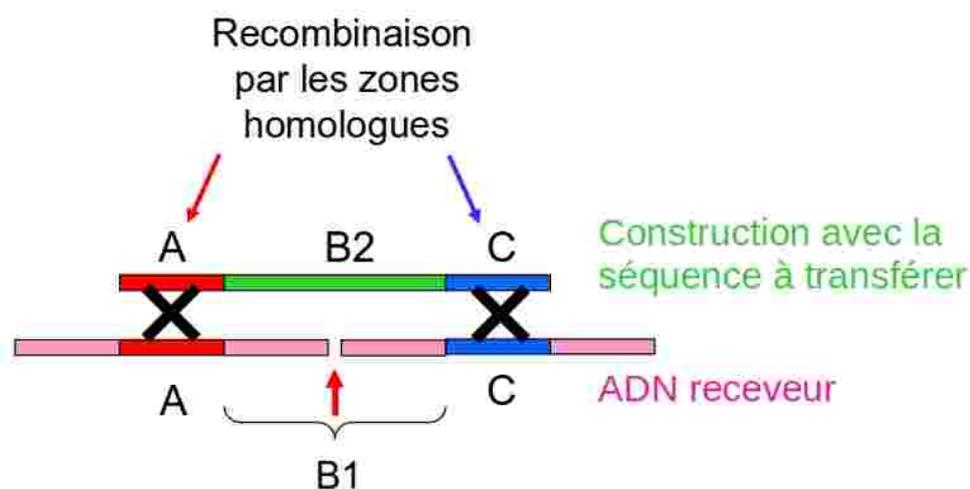


Figure 1. La technique d'édition du génome (SDN2) permet de remplacer une séquence d'un allèle par une autre séquence homologue et peut aller jusqu'à remplacer de façon précise un allèle par un autre. Dans ce cas, seul l'allèle est transmis ; par rapport à la méthode par voie sexuée par rétro-croisement, il en résulte un gain de temps et une grande précision (seul l'allèle d'intérêt est transmis). Ici, B1 est la séquence à remplacer, B2 la séquence à transférer. A et C sont des séquences situées de part et d'autre de la séquence à transférer. La flèche verticale indique le point de coupure par l'enzyme (nucléase).

soit la méthode de transfert, par la transgénèse (aléatoire ou ciblée) ou par ingénierie cytogénétique avec croisements entre espèces non interfertiles, de même que la translocation d'un fragment chromosomique, correspondent à des modifications du génome nucléaire.

La création de nouveaux génomes est un autre type de modification des génomes nucléaires ; elle correspond, d'une part, à la modification du niveau de ploïdie et, d'autre part, à la création des nouvelles espèces ou espèces synthétiques, dont le génome réunit les génomes élémentaires d'espèces sexuellement incompatibles, quelle que soit la méthode d'obtention (croisements interspécifiques ou fusion de protoplastes). La modification des génomes nucléaires et cytoplasmiques couvre aussi la création de nouvelles combinaisons génome nucléaire x génome cytoplasmique, comme les cas de stérilité mâle obtenus par croisement

interspécifique ou par fusion de protoplastes.

La création de nouveaux génomes pourrait aller jusqu'à des génomes complètement artificiels, ce que l'on sait faire chez les bactéries (Gibson *et al.*, 2010). Chez la levure, Dymond *et al.* (2011) ont synthétisé de longs segments chromosomiques, qui, introduits à la place de leur homologue naturel, étaient bien fonctionnels. Une telle modification n'est pas encore possible pour les organismes supérieurs, plantes et animaux, mais Yu *et al.* (2016) ont déjà proposé de construire, pour les plantes, un chromosome artificiel qui serait porteur des transgènes introduits, cela pour éviter les effets de position de l'insertion des transgènes.

Les techniques utilisées pour modifier les gènes ou les génomes peuvent être plus ou moins dirigées. Ainsi la découverte des nucléases, enzymes qui peuvent



Figure 2. Photo de symptômes d'oidium de la vigne sur feuilles et grappes (Photo BASF). L'édition du génome permet de diriger les mutations de certains gènes (méthode SDN1). Chez la vigne la résistance à l'oidium a ainsi pu être obtenue (Wan et al., 2020). L'allèle de résistance pourrait donc être généré chez n'importe quel cépage sans changer ses caractéristiques œnologiques, alors que par voie sexuée, par la technique de rétrocroisement, il faudrait une quinzaine d'années pour introduire l'allèle de résistance et il y aurait changement de certaines caractéristiques du cépage.

couper la chaîne d'ADN en des points précis du génome, a conduit à trois types de techniques de modification des gènes d'un génome, dénommées SDN, pour *site directed nucleases* (Casacuberta et Nogué, 2016) : (1) SDN1, où la séquence d'ADN d'un gène est coupée en un point précis et on laisse la réparation se faire ; il en résulte en général une réparation conforme et, dans quelques cas, une modification avec perte aléatoire ou ajout de quelques bases, d'où une mutation, (2) SDN2, où une séquence d'un gène est remplacée par une séquence homologue de la même espèce ou d'espèces apparentées, ou d'un gène orthologue, c'est-à-dire d'un gène d'une espèce plus éloignée, dérivant d'un même gène ancêtre, ce qui conduit à un nouvel allèle et peut aller jusqu'au remplacement

d'un allèle par un autre (Figure 1), et (3) SDN3, qui permet d'insérer un nouveau gène en un point précis du génome, ce qui correspond à une transgénèse dirigée et est donc en fait une technique de modification du génome ; le gène inséré peut être de la même espèce (cas de cisgénèse) ou d'espèces différentes.

Ainsi, les techniques de mutagenèse sont de plus en plus précises : la mutagenèse aléatoire ne fait qu'augmenter la fréquence des mutations qui se produisent spontanément ; avec l'édition du génome (méthode SDN1) on cible un locus (Figure 2), mais il y a encore des aléas, et avec les techniques de *base editing*, la mutation devient totalement dirigée, puisque l'on peut remplacer de façon dirigée une base de la chaîne d'ADN par une autre (Kim, 2018) ; avec les techniques de *prime editing* on peut éditer une séquence de plus d'une dizaine de bases (Anzalone et al., 2019).

Des techniques « non naturelles », qui, du point de vue génétique, ne conduisent pas à des OGM

La définition proposée, comme celle qui est donnée par la directive 2001/18 ou celle du Protocole de Carthagène, se place du point de vue génétique. Du point de vue biologique, il y a d'autres organismes obtenus de façons « non naturelles », l'intervention du sélectionneur, mais qui ne conduisent pas à des modifications intentionnelles du patrimoine génétique.

C'est notamment le cas de l'haplodiploïdisation, une technique aujourd'hui très utilisée en amélioration des plantes pour obtenir rapidement des lignées à partir d'un croisement de deux plantes : elle consiste à régénérer des plantes haploïdes à partir des cellules mères des gamètes, par androgenèse (à partir des microspores) ou gynogenèse (à partir des ovules), puis à doubler leur nombre de

chromosomes pour obtenir des plantes diploïdes, parfaitement homozygotes.

De tels phénomènes peuvent se produire naturellement chez certaines espèces, mais ils sont rares. L'haploïdisation peut aussi être obtenue par des croisements interspécifiques (cas chez l'orge *Hordeum vulgare* avec le croisement par *Hordeum bulbosum*, ou même par le maïs) ou par croisement avec des génotypes inducteurs (cas chez le maïs) (Gallais, 2013). Si l'on suppose que ces techniques n'agissent pas sur les gènes nucléaires, alors les plantes obtenues ne sont pas des OGM du point de vue génétique. C'est aussi le cas de la régénération maîtrisée de plantes à partir de fragments de tissus ou de cellules.

De même, l'autofécondation chez les plantes allogames avec un sachet qui isole l'inflorescence, n'est pas naturelle : elle se fait par l'intervention de l'Homme. Toutefois elle conduit à un organisme issu de plantes dont les gènes n'ont pas été intentionnellement modifiés par l'Homme. Ce n'est donc pas un OGM au sens de la définition de la directive 2001/18 comme au sens de la définition proposée. Cependant, chez les plantes allogames, on peut remarquer que la régulation des gènes peut être très modifiée par l'homozygotie du génome : ainsi une lignée de maïs est un peu un « monstre » créé par l'Homme, car la forte dépression de consanguinité s'explique bien par la modification de l'environnement génétique des gènes, qui modifie notamment leur régulation et leur expression (Gallais, 2009).

On peut aussi s'interroger sur le statut d'un hybride contrôlé entre deux lignées : c'est un organisme non naturel, mais ce n'est pas un OGM au sens de la définition proposée, puisque les gènes, aux mutations spontanées près, sont les mêmes que chez les parents. De façon plus générale, avec la définition proposée, un individu issu du croisement de deux plantes ne peut pas être considéré comme un OGM si ses gènes n'ont pas été

modifiés par rapport à ses parents par l'intervention de l'Homme. Cependant, comme souligné précédemment, la régulation génique peut être modifiée par rapport aux parents lignées pures.

Les variétés hybrides obtenues par l'utilisation d'un système de stérilité mâle intraspécifique (déterminée à la fois par des gènes nucléaires et des gènes mitochondriaux) ne sont pas non plus des OGM car ce système est naturel chez des espèces à fécondation croisée avec des populations constituées d'un mélange de plantes mâles et femelles fertiles (dites hermaphrodites) et de plantes mâles stériles (uniquement femelles) ; en outre, il n'y a pas modification de gènes.

Si la stérilité mâle est obtenue par croisements interspécifiques ou en faisant appel à la fusion de protoplastes d'espèces différentes (cas de la stérilité mâle « Ogu-INRA » chez le colza et autres Brassicacées), cela conduit à de nouvelles associations entre gènes mitochondriaux, chloroplastiques et nucléaires, et donc, d'après la nouvelle définition d'un OGM, ce seraient des OGM, quel que soit le mode d'obtention. D'après la directive 2001/18, seule la fusion de protoplastes conduit à des OGM, alors que le résultat est le même que par croisements interspécifiques, qui eux ne sont pas considérés comme conduisant à des OGM, ce qui traduit un manque de cohérence sur le plan génétique.

Le rétrocroisement, ou back-cross, qui conduit à remplacer par voie sexuée, à un locus, un allèle par un autre, ne conduit pas non plus à un OGM, car le gène transféré n'a pas été modifié (notons que, selon la directive 2001/18, la même opération par SDN2 conduit à un OGM réglementé, ce qui n'est pas cohérent). D'une façon plus générale, la sélection traditionnelle qui fait appel aux systèmes de reproduction, comme l'autofécondation et le croisement, modifie l'association des allèles, et la variété obtenue

correspond à une association particulière d'allèles, mais elle n'est pas un OGM, car, au niveau du matériel de départ, les allèles eux-mêmes n'ont pas été modifiés par l'intervention de l'Homme. Ainsi, selon la définition proposée, la sélection généalogique comme la sélection assistée par marqueurs ne peuvent pas être considérées comme conduisant à des OGM.

Parmi tous les OGM du point de vue génétique, il faut distinguer OGM réglementés et OGM non réglementés

La réglementation des OGM doit venir après leur définition génétique. Il peut alors y avoir, parmi tous les OGM possibles du point de vue génétique, des OGM réglementés et des OGM non réglementés. Pour cela, la directive européenne 2001/18 fait intervenir la sécurité sanitaire et environnementale, par application du principe de précaution. Cette directive est fondée sur les techniques d'obtention des modifications génétiques et non sur les produits (les caractères des plantes) : ce sont les techniques en elles-mêmes qui entraîneraient des risques au niveau des produits, ce qui n'a jamais été démontré.

Si l'on reste dans l'esprit de la directive 2001/18, il faudrait d'abord exclure clairement de la réglementation sur les OGM toutes les techniques classiquement utilisées en amélioration des plantes qui ne modifient pas les gènes ou les génomes et, donc, ne conduisent pas à des OGM du point de vue génétique : l'autofécondation, le croisement, la culture *in vitro*, la fécondation *in vitro*, l'haplodiploïdisation faisant appel à l'androgénèse, ou à la gynogénèse, ou au croisement avec des géniteurs inducteurs d'haploïdie, la sélection généalogique, la sélection assistée par marqueurs.

Ensuite on devrait exempter de la réglementation des techniques qui modifient les gènes ou les génomes et, donc, conduisent à des OGM, mais qui, selon les

termes de la directive, sont classiquement utilisées et avec une sécurité avérée : la mutagenèse aléatoire, les croisements interspécifiques, la translocation de fragments chromosomiques homéologues, le doublement de chromosomes et, plus généralement, la modification du niveau de polyploïdie.

Il faudrait aussi exempter de la réglementation (1) la fusion de protoplastes d'espèces pouvant échanger du matériel génétique par des méthodes traditionnelles, qui conduit à des organismes pouvant être obtenus par voie sexuée, mais plus rapidement, et (2) la mutagenèse dirigée (SDN1 et l'édition d'allèles base à base) qui conduisent à des modifications géniques de même nature que la mutagenèse aléatoire, ainsi que le remplacement par SDN2 d'une séquence d'un allèle par une autre séquence homologue de la même espèce ou des espèces apparentées ou d'un gène orthologue, en y incluant le remplacement d'un allèle par un autre qui peut être réalisé par rétrocroisement, mais avec beaucoup plus de temps et moins parfaitement.

Malheureusement cela n'a pas été la logique de la Cour européenne de justice, qui, dans son arrêt du 25 juillet 2018, a confirmé que les variétés obtenues par des outils de mutagenèse « traditionnelle » avant 2001 sont exclues de la réglementation OGM, tandis que celles qui ont obtenues après 2001 par les techniques d'édition du génome sont considérées comme des OGM relevant de cette réglementation, ce qui conduit à des incohérences : ainsi, chez le maïs ou la pomme de terre, une variété avec l'allèle *waxy*, qui augmente la teneur en amylopectine de l'amidon, sera considérée OGM ou non selon le mode d'obtention de cet allèle, édition du génome ou mutagenèse aléatoire (Huang *et al.*, 2020).

Avec cette approche, compte tenu de la définition donnée d'un OGM, on aurait des variétés OGM exemptées de la réglementation ou OGM non réglementés,

équivalent de l'annexe IB de la directive 2001/18 ; ce serait le cas des variétés (1) portant des mutations obtenues par mutagenèse aléatoire ou dirigée, en y incluant les mutations ponctuelles par SDN1 et édition base à base ainsi que la modification d'un allèle par SDN2 avec des séquences homologues de l'espèce ou des espèces apparentées ou d'un gène orthologue, (2) de nouvelles espèces obtenues par croisements interspécifiques ou par fusion de protoplastes entre espèces pouvant échanger du matériel génétique, et (3) de plantes dont on a modifié le niveau de ploïdie.

Cela engloberait donc les cas de la directive 2001/18 où la mutagenèse aléatoire est bien exclue de la directive (exclusion confirmée par l'arrêt de la Cour européenne de justice du 25 juillet 2018), de même que la fusion de protoplastes entre espèces proches (annexe IB) ; quant au doublement du nombre de chromosomes, il n'a pas été considéré comme une technique conduisant à des OGM, ce qui est incohérent du point de vue génétique (annexe IA, deuxième partie).

Les techniques conduisant à des OGM réglementés (équivalent de l'annexe IA, première partie de la directive 2001/18) seraient alors : (1) la transgénèse aléatoire ou dirigée par SDN3, insérant un gène étranger en un point précis du génome, et (2) la fusion de protoplastes entre espèces ne pouvant pas échanger de matériel génétique par des méthodes utilisées classiquement en sélection. Ces techniques devraient être revues régulièrement, en fonction des connaissances sur les risques et de l'évolution des outils avec leur maîtrise de plus en plus grande.

Ainsi, depuis la mise en œuvre de la transgénèse pour la création variétale, au début des années 1990, soit depuis 30 ans environ, il n'est apparu aucun danger sanitaire avec les variétés transgéniques, et les risques environnementaux soulignés ne peuvent pas être attribués à l'outil utilisé, mais à l'usage fait de variétés transgéniques portant certains

caractères, telle la tolérance aux herbicides. En outre, la maîtrise de la transgénèse, notamment avec la maîtrise du site d'insertion du transgène, est de plus en plus grande. Aujourd'hui, avec les connaissances acquises, la transgénèse aléatoire ou dirigée devrait donc être retirée de la liste des techniques conduisant à des OGM réglementés, et les variétés transgéniques devraient être évaluées pour les caractères qu'elles apportent avec leurs bénéfices et leurs risques éventuels.

Les propositions qui précèdent ne changent rien dans ce qui relève actuellement de la réglementation selon la directive 2001/18. Elles mettent d'abord plus de cohérence dans ce qui est appelé OGM, ce qui implique de modifier la définition donnée d'un OGM. Ainsi elles conduisent à préciser les techniques traditionnellement utilisées évoquées dans l'annexe 17 ; un certain nombre de techniques en seraient exclues, notamment les croisements interspécifiques entre espèces non interfertiles, la manipulation du degré de ploïdie et les translocations de fragments chromosomiques qui conduisent bien à des OGM, mais qui seraient exemptés de la réglementation.

Ensuite elles y ajoutent les techniques d'édition du génome qui conduisent à des OGM, en exemptant de la réglementation les variétés obtenues par l'utilisation des techniques d'édition d'allèles qui conduisent à des mutations géniques ou à des substitutions de séquences avec des séquences homologues de l'espèce ou des espèces apparentées, ou de séquences issues de gènes orthologues.

L'exemption de la directive des plantes avec des allèles modifiés par édition génomique a été proposée en France et en Allemagne par l'AFBV et son homologue allemand le WGG (respectivement Association française des biotechnologies végétales et *Wissenschaft-lerkreis Grüne Gentechnik* e.V.). Les exemptions

proposées recouvrent quatre catégories de modifications quelles que soient les techniques utilisées pour les obtenir : (1) l'allèle édité est déjà connu dans l'espèce ou ses apparentées, (2) l'allèle édité correspond à un gène orthologue, (3) l'allèle édité pourrait être obtenu par mutagenèse spontanée ou induite et (4) le gène connu dans l'espèce ou ses apparentés est inséré dans un site donné de son génome (cas de cisgénèse). L'Académie d'agriculture de France (2020) a pris position en faveur de l'utilisation des techniques d'édition du génome dans la mesure où tout allèle réécrit le serait de sorte que la fonction du gène qui en résulte procède de celle d'un autre allèle ou d'un gène orthologue. Au niveau européen, les académies européennes des sciences (AIEA, 2020) encouragent fortement la modification de la réglementation européenne sur les OGM pour permettre à l'agriculture de bénéficier de l'apport de l'édition du génome à l'amélioration des plantes.

Au niveau mondial, les États-Unis ont déjà exclu de leur propre réglementation sur les OGM les modifications obtenues par édition d'allèles (par mutation dirigée ou substitution de séquences par des séquences homologues de l'espèce ou de ses apparentés), et les variétés qui en dérivent peuvent être, et sont déjà, commercialisées sans réglementation spécifique. Au Canada, la réglementation des modifications génétiques, qui recouvre celle de la sélection conventionnelle, est fondée sur le produit, et non sur la méthode d'obtention : il n'y a donc aucune réglementation spécifique pour les variétés ayant fait appel à l'édition génomique. Actuellement plus d'une vingtaine de pays ont des réflexions pour exclure de leur réglementation OGM des variétés ayant fait appel à certaines techniques d'édition d'allèles en se fondant soit sur les techniques utilisées, soit sur la nature de la modification réalisée (de l'allèle édité) ou le type de plante produite (Menz *et al.*, 2020).

Les propositions faites mettent aussi plus de cohérence dans ce qui relève de la réglementation OGM. Ainsi des mutations géniques obtenues par mutagenèse aléatoire ou par mutagenèse dirigée, conduisant au même phénotype, ou des génomes nouveaux obtenus par croisements interspécifiques ou fusion de protoplastes, conduisant à la même structure génomique, ne peuvent pas avoir des statuts différents selon leurs modes d'obtention ; c'est le résultat au niveau de la modification génétique ou génomique qui compte. En conséquence, les propositions faites conduisent à seulement deux catégories d'OGM : ceux qui relèvent de la réglementation et ceux qui n'en relèvent pas, alors qu'avec la réglementation actuelle il y a des modifications majeures du génome, qui du point de vue génétique conduisent à des OGM, mais ne sont pas considérées comme telles par la directive 2001/18 car obtenues par des techniques « traditionnellement » utilisées par le sélectionneur.

Cependant, au-delà d'une simple révision de la directive 2001/18 tenant compte des connaissances génétiques actuelles et du développement des nouveaux outils d'édition du génome, il est clair qu'il en faudrait une révision en profondeur et que la réglementation ne devrait pas être fondée sur les techniques, mais sur le produit, c'est-à-dire sur les caractères des plantes obtenues par les modifications génétiques. Ce ne sont pas les méthodes de modification génétique en elles-mêmes qui présentent des risques, mais, éventuellement, les caractères des plantes obtenues ou l'utilisation de ces plantes. C'est au niveau des plantes obtenues, selon leurs caractères, que l'on doit décider s'il faut faire des études spécifiques pour commercialiser les plantes génétiquement modifiées. Cela conduit donc à des études des bénéfices et des risques au cas par cas. À noter qu'au niveau mondial, le Canada a une réglementation fondée sur

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Opinion

les caractéristiques des plantes obtenues et non sur les techniques utilisées pour réaliser les modifications génétiques, avec des études au cas par cas (Health Canada, 2021). C'est la solution la plus logique.

Remerciements

L'auteur tient particulièrement à remercier d'une part Georges Pelletier et Fabien Nogué, pour leurs remarques très constructives sur le manuscrit, ainsi que pour certaines références, et, d'autre part, Philippe Dumont et Georges Freyssinet pour leurs commentaires sur les aspects réglementaires.

Références

Académie d'agriculture de France, 2020. *Réécriture du génome, éthique et confiance*. Avis du 8/1/2020.

AFBV. 2021. *Explanatory Note supporting the AFBV-WGG Initiative. Suggestions to enable the development of genome editing in Europe*. <https://www.biotech-gm-food.com/wissenschaft/afbv-wgg-explanatory-note-supporting-the-initiative-regulation-genome-editing>.

AllEA. 2020. *Report reviews debate on genome editing for crop improvement*. [https://allea.org/Academies' report reviews debate on genome editing for crop improvement/](https://allea.org/Academies%20report%20reviews%20debate%20on%20genome%20editing%20for%20crop%20improvement/).

Anzalone AV, Randolph PB, Liu DR. 2019. Search-and-replace genome editing without double-strand breaks or donor DNA, *Nature*, 576, 149-157.

Berg P, Baltimore D, Brenner S, Roblin III RO, Singer MF. 1975. *Summary Statement of the Asilomar Conference on Recombinant DNA Molecules, Proceedings of the National Academy of Science*, 72, 6, 1981-1984.

Casacuberta JM, Nogué F. 2016. Impact des nouvelles techniques de modification des génomes sur la sélection végétale, *Potential de la science pour une agriculture durable* (publication Académie d'agriculture de France). <https://www.academie-agriculture.fr/academie/grouper-de-travail/potentiels-de-la-science-pour-une-agriculture-durable>

Charrier A, Bernard M. 1981. Hybridation interspécifique et amélioration des plantes. III. Amphiploïdes et formes introgressives, *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 12, 1025-1040.

Choulet F. 2021. Communication personnelle.

Commission européenne. 1990. *Directive du Conseil du 23 avril 1990 relative à la dissémination volontaire d'organismes génétiquement modifiés dans l'environnement (90/220/CEE)*.

Commission européenne. 2001. *Directive 2001/18/CE du Parlement européen et du conseil du 12 mars 2001 relative à la dissémination volontaire d'organismes génétiquement modifiés dans l'environnement et abrogeant la directive 90/220/CEE du Conseil*. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2001L0018:20080321:FR:PDF>

Cour européenne de Justice. 2018. *Arrêt du 25/07/2018*. <https://curia.europa.eu/jcms/upload/docs/application/pdf/2018-07/cp180111fr.pdf>

Doudna J, Charpentier E. 2014. The new frontier of genome engineering with CRISPR-Cas9, *Science*, 346, 1077.

Dymond JS, Richardson SM, Coombes CE, Babatz T, Muller H, Annaluru N, Blake WJ, Schwerzmann JW, Dai J, Lindstrom DL, Boeke AC, Gottschling DE, Chandrasegaran S, Bader JS, Boeke JD. 2011. Synthetic

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Opinion

chromosome arms function in yeast and generate phenotypic diversity by design, *Nature*, 477, 471-476.

EFSA. 2012. *Panel on Genetically Modified Organisms (GMO); Scientific opinion addressing the safety assessment of plants developed through cisgenesis and intragenesis*, *EFSA Journal*, 10(2), 2561-2594.

Fuentes I, Stegemann S, Golczyk H, Karcher D, Bock R. 2014. Horizontal genome transfer as an asexual path to the formation of new species, *Nature*, 511, 232-235.

Gallais A. 2003. *Quantitative genetics and breeding methods in autopolyploid plants*. Editions Quae, Paris.

Gallais A. 2009. *Hétérosis et variétés hybrides en amélioration des plantes*. Éditions Quae, Paris.

Gallais A. 2013. De la domestication à la transgénése, *Évolution des outils pour l'amélioration des plantes*. Éditions Quae, p. 91-92.

Gallais A., 2021. *Qu'est-ce qu'une variété OGM ? Exemple de la variété de blé tendre « Renan »*, *Phytoma*, 742, 46-48.

Gallais A, Ricroch A. 2006. *Plantes transgéniques : faits et enjeux*. Éditions Quae, Paris.

Gao L, Koo DH, Juliana J, Rife T, Singh D, Lemes da Silva C, Lux T, Dorn KM, Clinesmith M, Silva P, Wang X, Spannagl M, Monat C, Friebe B, Steuernagel B, Muehlbauer GJ, Walkowiak S, Pozniak C, Singh R, Stein N, Mascher M, Fritz A, Poland J2021. The *Aegilops ventricosa* 2Nv-S segment in bread wheat: cytology, genomics and breeding, *Theoretical and Applied Genetics*, 134, 529–542.

Gibson GD, Glass JI, Lartigue C, Noskov VN, Chuang R-Y, Algire MA, Benders GA, Montague MG, Ma L, Moodie MM, Merryman C, Vashee S,

Krishnakumar R, Assad-Garcia N, Andrews-Pfannkoch C, Denisova EA, Young L, Qi ZQ, Segall-Shapiro TH, Calvey CH, Parmar PP, Hutchison III CA, Smith HO, Venter JG. 2010. Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome, *Science*, 329 (5987), 52-56.

Health Canada, 2021. *Proposed Changes to Health Canada Guidance on the interpretation of Division 28 of Part B of the Food and Drug Regulations (the Novel Food Regulations): When is a food that was derived from a plant developed through breeding a “novel food”?*, https://cban.ca/wp-content/uploads/Proposed-HC-Guidance-Novelty-Interpretation-2021_03_12-EN.pdf

Huang L, Sreenivasulu N, Liu Q. 2020. Waxy editing: old meets new, *Trends in Plant Science* 25, 963-966.

Jackson DA, Symons RH, Berg P. 1972. Biochemical method for inserting new genetic information into DNA of simian virus 40: circular SV40 molecules containing lambda-phage genes and the galactose operon of *E. coli*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 69, 2904-2909.

Jahier J. 1982. *Utilisation d'hybrides interspécifiques dans l'amélioration du blé*, *Le Sélectionneur Français*. 30, 5-12.

Jahier J. 2019. *Évaluation et exploitation de translocations blé-seigle dans le blé tendre*. Colloque FSOV, 8 janvier 2019.

Kim JS. 2018. Precision genome engineering through adenine and cytosine base editing, *Nature Plants*, 4, 148–151.

Maïa N. 1967. Obtention de blés tendres résistants au piétin verse par croisements interspécifiques blés x *Aegilops*, *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 53, 149-154.

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Opinion

Martin A, Alvarez JB, Martin LM, Barro F, Ballesteros J. 1999. Development of *Tritordeum*: A Novel Cereal for Food Processing, *Journal of Cereal Science*, 30, 85–95.

Menz J, Modrzejewski D, Hartung F, Wilhelm R, Sprink T. 2020. Genome Edited Crops Touch the Market: A View on the Global Development and Regulatory Environment, *Frontiers in Plant Science*, doi 11:586027.

Ramsey J, Schemske DW. 1998. Pathways, mechanisms and rates of polyploid formation in flowering plants, *Annual Review in Ecology, Evolution and Systematics*, 29, 467–501.

Protocole de Carthagène, 2001.
<http://bch.cbd.int/protocol/text/>

SAM. 2017. *New Techniques in Agricultural Biotechnology*, DOI 10.2777/17902.

SAM. 2018. *Statement by the Group of Chief Scientific Advisors. A Scientific Perspective on the Regulatory Status of Products Derived from Gene Editing and the Implications for the GMO Directive*,
https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/2018_11_gcsa_statement_gene_editing_1.pdf.

de Vries H. 1909. *Espèces et variétés : Leur naissance par mutation* (traduction Blaringhem L). Librairies Félix Alcan et Guillaume réunies, Paris.

Wan DY, Guo Y, Cheng Y, Hu Y, Xiao S, Wang Y, Wen YQ. 2020. CRISPR/Cas9-mediated mutagenesis of VvMLO3 results in enhanced resistance to powdery mildew in grapevine (*Vitis vinifera*), *Horticulture Research*, 7, 116, 1-14.
<https://doi.org/10.1038/s41438-020-0339-8>.

Yu W, Yau YY, Birchler JA. 2016. Plant artificial chromosome and its potential application in genetic engineering, *Plant Biotechnology Journal*, 14, 1175-1182.

Édité par

Michel Dron, professeur émérite de biologie végétale à l'Université Paris-Saclay, membre de l'Académie d'agriculture de France

Rapporteurs

Les réviseurs souhaitent rester anonymes.

Rubrique

Cet article a été publié dans la rubrique «Opinions» des *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France*.

Reçu

29 mars 2021

Accepté

20 avril 2021

Publié

15 mai 2021

Citation

Gallais A. 2021. *Retour sur la définition d'un OGM en amélioration des plantes. Points de vue génétique et réglementaire*, *Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF)*, 11(,5) 1-15.
<https://doi.org/10.58630/pubac.not.a621966>.



André Gallais est professeur honoraire de génétique et amélioration des plantes à AgroParisTech, membre de l'Académie d'agriculture de France.

Notes
académiques
de
l'Académie
d'agriculture
de
France



ACADÉMIE
d'AGRICULTURE
de FRANCE

AGRICULTURE ■ ALIMENTATION ■ ENVIRONNEMENT