

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France



Volume 1 (2016)



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 scientifique, technologique et technique, 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 1, 2016

DOI : <https://doi.org/10.58630/pubac.not.v642331>

- .Boussard JM. 2016. **A propos des coûts externes des pesticides**, Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / *Academic Notes from the French Academy of Agriculture*, 1(1), 1-7.
<https://doi.org/10.58630/pubac.not.a113501>
- Richard H. 2016. **De quelques composés odorants/Of some odorant compounds**, Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / *Academic Notes from the French Academy of Agriculture*, 1(2), 1-10.
<https://doi.org/10.58630/pubac.not.a958199>
- This H. 2016. **“Maillard products” and “Maillard reactions” are much discussed in food science and technology, but do such products and reactions deserve their name?**, Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / *Academic Notes from the French Academy of Agriculture*, 1(3), 1-10.
<https://doi.org/10.58630/pubac.not.129775>

Analyses d'ouvrages/Text Commentary

A propos des coûts externes des pesticides

About the external costs of pesticides

Jean-Marc Boussard

Correspondance :

jmarc.boussard@orange.fr

Résumé : Une récente publication de Bourguet et Guillemaud (2016) estime le coût des pesticides pour la collectivité. Son contenu est discuté.¹

Abstract: A recent publication by Bourguet and Guillemaud (2016) is discussed. It estimates the costs of pesticides for the society. These estimations are discussed.

Introduction

Une publication récente (Bourguet et Guillemaud, 2016) rend compte d'un travail réalisé à l'INRA sur le coût total de l'usage des pesticides pour la collectivité. Elle a suscité un grand écho médiatique, avec plusieurs articles de grande presse (notamment celui de Stéphane Foucart dans *Le Monde*, numéro daté du 22 mars 2016), tendant à conclure que, puisque les pesticides coûtent si cher, il serait temps d'en interdire l'usage. Tout cela mérite quelques remarques.

Toute activité économique engendre des

coûts et des avantages. Certains sont internes : ils ne concernent que les agents (personnes physiques ou morales) directement impliqués dans la mise en œuvre de l'activité. La comparaison de ces coûts internes avec les avantages (ou « bénéfiques ») correspondants permet de décider de la réalisation d'un « projet », qu'il s'agisse d'un investissement ou, simplement, de l'utilisation d'une nouvelle technique. D'autres coûts et avantages sont externes : ils concernent des agents qui supportent ces coûts ou bénéficient de ces avantages sans avoir participé à la décision de la mise en œuvre de ces activités, dont les conséquences leur sont, de ce fait, imposées. L'exemple traditionnel, en la matière, est celui de la ruche, dû à James Meade (Meade, 1952), l'un des premiers prix Nobel d'économie (1977), et repris depuis dans tous les manuels : la ruche, établie par un apiculteur pour son miel, bénéficie aussi au propriétaire du verger voisin, dont les arbres sont pollinisés.

Dans le cas de la ruche, ces effets externes sont positifs, et personne ne s'en plaint. Les coûts externes, en revanche,

¹ Merci à Hervé This et à Bernard Le Buanec pour leurs commentaires sur une première version de ce texte.

Analyses d'ouvrages/Text Commentary

sont à l'origine de conflits. Ceux-ci ne peuvent pas être résolus par des mécanismes de marché, puisque les prix n'apportent d'information aux décideurs qu'à travers les coûts et des bénéfices internes. L'intervention publique se justifie dans une telle situation. Elle doit faire en sorte que les bénéficiaires d'avantages internes indemnisent les perdants externes, ce qui est réalisable en principe (par exemple, grâce à une fiscalité adéquate), à condition que l'ensemble des bénéfices excède l'ensemble des coûts (bien entendu, les bénéfices internes, par exemple ceux des agriculteurs, excèdent les coûts internes, par exemple les coûts de production des produits phytosanitaires, sans quoi le problème ne se poserait pas). C'est dans ce cadre que Bourguet et Guillemaud essaient d'évaluer tous les coûts internes et externes impliqués dans la production et l'usage des pesticides dans le monde. C'est évidemment une tâche formidable, d'autant plus que les deux seules catégories « internes » et « externes » ne suffisent pas à faire le tour du problème.

Dans les coûts internes, il y a des coûts directs – ceux qui apparaissent dans les comptabilités des agriculteurs et sont, de ce fait, assez faciles à connaître – et d'autres coûts indirects non comptables, par exemple les dépenses associées aux maladies professionnelles liées à des normes d'utilisation trop laxistes ou à des manipulations non conformes. En général, ces derniers coûts n'apparaissent pas dans les comptabilités, de sorte qu'il faut les estimer.

Les coûts externes (les plus importants politiquement, puisqu'ils intéressent l'action publique), eux aussi, sont parfois directs et parfois indirects. Dans les coûts externes directs des pesticides, ceux qui figurent

dans les comptabilités, il y a, par exemple, les dépenses additionnelles à consentir pour éliminer les résidus dans les réseaux d'eau urbaine. Ceux-là sont relativement faciles à inventorier. Puis il y a des coûts indirects, beaucoup plus difficiles à évaluer, tel celui qui est lié au fait que les pesticides affectent les populations de nombreuses espèces de la flore et de la faune sauvage... Pour les évaluer, il faut attribuer une valeur monétaire aux fleurs et aux oiseaux, ce qui n'est pas simple.

Il serait évidemment impossible à deux chercheurs, à eux seuls, de réunir et colliger tous les documents qui seraient nécessaires pour résoudre les difficultés qui viennent d'être évoquées. Heureusement le sujet, depuis une vingtaine d'années, a suscité de nombreux travaux, de sorte que le document de Bouguet et Guillemaud est constitué pour l'essentiel par la recension des ouvrages ainsi produits. Soixante-et-un d'entre eux -les plus sérieux- sont passés à la loupe. Il est difficile de ne pas être admiratif devant un tel effort. Reste toutefois la question de la fiabilité des résultats et, surtout, de leur interprétation.

En ce qui concerne la fiabilité, il est facile de voir qu'elle est assez faible. Par exemple, les auteurs citent une étude (Jungbluth, 1996) visant à estimer le coût des résidus de pesticides dans l'alimentation en Thaïlande. Si l'on admet que 10 % des fruits et légumes du pays contiennent un taux de résidus suffisant pour les rendre impropres à la consommation, alors ce coût est de 5 milliards de bahts en 1996. Mais si tous les fruits et légumes produits, nonobstant leur exposition aux pesticides, sont en réalité consommables, alors le coût externe direct se réduit à celui de la police spécialisée dans la détection des fraudes

Analyses d'ouvrages/Text Commentary

en la matière, soit environ 48 millions de bahts. Le coût réel se situe à l'intérieur de cette fourchette... dont l'écartement des dents, de 1 à 104, est considérable !

De la même manière, on est un peu perplexe quand on voit imputer aux pesticides les surcoûts de l'eau minérale par rapport à celle du robinet. Il ne fait pas de doute que quelques personnes refusent de boire l'eau du robinet pour l'unique raison qu'elles craignent d'y trouver des résidus de pesticides. A cause de cela, elles se reportent sur l'eau minérale. Mais ce n'est pas le cas, loin de là, de tous les consommateurs d'eau minérale : la plupart d'entre eux continueraient à en utiliser même dans l'hypothèse où ils seraient complètement sûrs de ne jamais trouver le moindre résidu de pesticide dans l'eau du robinet. Il est donc un peu exagéré d'attribuer aux pesticides tous les coûts de cette consommation de luxe...

Le même type de remarques pourrait être fait en beaucoup d'endroits de cette étude, impliquant la conclusion que les coûts indiqués sont, sinon considérablement surestimés, du moins des « fourchettes très hautes ». Cela ne signifie pas que ces travaux soient inutiles, mais qu'il faut en prendre les résultats avec précaution.

Reste la question centrale, à laquelle les auteurs ne répondent pas (parce que ce n'était pas leur sujet), mais que les commentateurs n'hésitent pas à considérer comme tranchée : si l'on additionne tous ces coûts, ne faut-il pas en conclure que le rapport bénéfices sur coût des pesticides est largement inférieur à l'unité, ce qui devrait en justifier l'interdiction formelle dans un état bien policé ?

Le problème est que la réponse à cette question dépend évidemment des coûts, mais aussi des avantages : un coût élevé est parfaitement justifié si les bénéfices

sont encore plus grands. Pour être complets, Bourguet et Guillebaud auraient donc dû évaluer les bénéfices comme ils l'ont fait pour les coûts. Mais comment ?

Il existe depuis longtemps une ample littérature sur cette question de « l'analyse bénéfices-coûts ». On citera par exemple Sen et Dasgupta (1972) ou Little et Mirrlees (1969). A côté de quelques divergences, il existe un consensus chez tous les auteurs concernés : le problème est de comparer deux « états du monde » plus ou moins hypothétiques, l'un « avec » et l'autre « sans » le projet étudié. Dans notre cas, il nous faut donc comparer la situation du monde « avec » et « sans » pesticides. La première est relativement bien connue, puisque c'est celle que nous observons actuellement. Quelle serait alors la situation « sans » pesticides, et comment l'imaginer ?

Évidemment les coûts calculés précédemment disparaîtraient, mais d'autres surgiraient. On peut essayer d'en avoir des ordres de grandeur de « coin de table » - au fond, pas si différents dans leur esprit de ceux qui ont servi à calculer certains au moins des coûts qui viennent d'être évoqués.

L'effet le plus évident de la suppression de tout pesticide dans les agricultures du monde serait de diminuer les productions agricoles. Il est difficile de dire quelle serait l'ampleur du phénomène, mais il semble assez raisonnable de tableer sur quelque chose de l'ordre de 30 % de la production actuelle. Avec une élasticité prix² de l'ordre de 0,5 (un chiffre

2 L'élasticité prix d'un produit donne le % d'augmentation de la quantité demandée en réponse à un accroissement du prix de 1 % : une élasticité de 0,5 veut donc dire qu'une baisse de prix de 1 % augmente la consommation de 0,5 %. Par symétrie, une baisse de l'offre de 1 % augmente le prix de 2 %.

Analyses d'ouvrages/Text Commentary

couramment admis en matière d'élasticité prix de produits alimentaires), cela correspondrait sur les marchés à un prix moyen qui serait de 60 % supérieur au prix actuel, pour une quantité inférieure de 30 %. L'augmentation de dépense des consommateurs serait donc de 30 % environ de la dépense actuelle. Cela n'est pas mince !

En première approximation, il est possible d'admettre que ce chiffre correspond au bénéfice réel de l'usage des pesticides. En effet, cet argent versé par les consommateurs aux producteurs de denrées végétales ne serait plus disponible pour autre chose... Or il l'est grâce aux pesticides : c'est donc bien un « bénéfice » associé à l'utilisation de ces produits, bénéfice qui revient aux consommateurs. On pourrait objecter à ce raisonnement que les sommes ainsi prélevées sur les consommateurs par l'abandon des pesticides reviendraient aux producteurs, mais c'est faux, car les producteurs utiliseraient cet argent pour couvrir leurs suppléments de coûts. De fait, les agriculteurs devraient augmenter leurs charges de main-d'œuvre pour désherber ou pratiquer l'échenillage manuel. Dans une économie concurrentielle (comme c'est le cas de l'agriculture), on sait bien que les coûts finissent toujours par être égaux aux prix. A cause de cela, cet argent que les consommateurs verseraient aux producteurs serait simplement dissipé par perte d'efficacité.

On notera, en revanche, que le fait de réduire les bénéfices externes de l'usage des pesticides à la diminution des prix de l'alimentation conduit à négliger d'autres avantages, comme ceux qui sont liés à la disparition des pathologies associées aux pénuries alimentaires dans les groupes les plus défavorisés. De même, la quasi-

disparition de nombreuses espèces nuisibles, comme, dans nos régions, les moustiques porteurs de paludisme, peut être considérée comme au moins partiellement liée à l'usage des insecticides. Ce sont là des bénéfices « externes » des pesticides qui ne sont pas forcément petits (ils excèdent probablement assez largement le coût des pathologies liées à ces produits). Nous les négligerons cependant ici afin de rester aussi pessimistes que possible.

Que donneraient les calculs ainsi conduits ? Nous ne ferons pas l'évaluation pour l'ensemble du monde, ce qui dépasserait les limites de cette note, et nous nous limiterons aux États-Unis, où tous les éléments du calcul sont à portée de main. Dans ce pays, la valeur de la production végétale est de l'ordre de 200 à 300 milliards de dollars (Wescott & Hansen, 2016). 30 % de ces valeurs font donc de 60 à 90 milliards de dollars, qui représentent les bénéfices des pesticides. Ils sont à comparer aux coûts indiqués par nos auteurs, (tableau 2.15 de leur article). Ces derniers s'échelonnent entre 20 000 et 40 000 millions de dollars, ou encore entre 20 et 40 milliards. Le ratio bénéfice/coût des pesticides dans ces conditions serait donc compris entre $60/40 = 1,5$ et $90/20 = 4,5$...

Si ces chiffres étaient avérés, il faudrait en conclure que, finalement, les pesticides ne s'en sortent pas si mal et qu'il serait bien dommage de s'en passer, même en présence des coûts plutôt surévalués signalés par nos auteurs, et avec des avantages plutôt sous évalués, comme ceux que nous venons de calculer. Et, bien sûr, les commentateurs auraient bien tort d'en réclamer l'abandon... Il y aurait cependant lieu d'aller un peu plus loin que cela, et dans deux directions.

Analyses d'ouvrages/Text Commentary

La première est un peu technique : l'abandon des pesticides dans l'agriculture mondiale ne produirait pas seulement un changement des prix agricoles. Ce sont tous les prix et toutes les quantités de l'économie qui se trouveraient affectés, y compris, au passage, ceux qui servent à évaluer les coûts. Il est donc très réducteur de borner l'étude aux seuls secteurs directement affectés par les pesticides, et en utilisant les prix courants.

Pour surmonter cette difficulté, il faudrait construire un véritable « modèle »³ de l'économie considérée, et le faire fonctionner « avec » et « sans » pesticides⁴. Alors, après avoir vérifié que le modèle donne à peu près la situation actuelle dans la situation « avec » pesticides, dans la situation « sans », on remplacerait les coefficients techniques de la production agricole, des industries de purification des eaux, des services de santé et d'autres activités par ceux que l'on peut attendre en l'absence de pesticides. Le bénéfice des pesticides serait alors mesuré par la différence de PIB entre les

deux situations, éventuellement diminuée d'une somme qui résulterait d'une évaluation de l'influence des pesticides sur les activités non marchandes, la faune et la flore.

Il est parfaitement possible de construire un tel modèle à partir des « tableaux d'échange inter-industriels » qui sont maintenant publiés par beaucoup d'organisations nationales et internationales⁵. Encore ceux-ci négligent-ils en général les effets de l'incertitude sur les prix, (et, en agriculture, sur les rendements) : or l'un des effets des pesticides est de réduire cette incertitude des rendements, ce qui peut conduire les agriculteurs à des augmentations de production beaucoup plus importantes que ne le ferait une simple augmentation des profits moyens⁶. Il est dommage que Bourguet et Guillemaud n'aient pas poursuivi dans ce sens leur travail sur les coûts... On ne peut que souhaiter que l'Inra leur donne les moyens de le faire.

La seconde direction de recherche suggérée par la lecture de cet article est plus philosophique : qu'on le veuille ou non, certains au moins des pesticides utilisés en agriculture sont « dangereux ». Ils peuvent créer des dégâts s'ils sont mal utilisés. Pire : dans certains cas, on en ignore les dangers réels, parce qu'on a cru à tort qu'ils étaient sans conséquence et on en découvre les nuisances a posteriori. Dès lors, se pose le problème de savoir si, quelle que soit l'espérance de ratio bénéfique/coût de ces produits, les

3 Le mot « modèle » est à double sens : il désigne parfois l'objet à représenter (le modèle du peintre) et, parfois, la représentation elle-même (le modèle réduit d'avion). Ici, c'est dans cette seconde acception qu'il doit être pris : un modèle économique est un ensemble de relations mathématiques dont les variables sont supposées se comporter comme les grandeurs correspondantes dans la réalité.

4 Encore un tel modèle resterait-il « statique », en négligeant toute considération de progrès technique, d'épargne et d'investissement. Or l'accumulation du capital physique ou intellectuel est en elle-même susceptible de faire évoluer les techniques : on peut très bien imaginer que l'utilisation des pesticides pendant quelques années soit une condition nécessaire pour dégager assez de revenus pour financer des recherches qui permettront plus tard de s'en passer sans pertes de rendements...

5 Le consortium GTAP (Hertel, 1990) en a même publié au niveau mondial. Le modèle qui en a été dérivé a été très largement sollicité pour vanter les mérites de la globalisation.

6 Une équipe de l'Inra et du CIRAD a récemment contribué à améliorer ces modèles sur ce point (Boussard *et al.*, 2005).

Analyses d'ouvrages/Text Commentary

autorités publiques peuvent laisser des intérêts particuliers faire supporter ces risques d'ampleur mal connue à leurs voisins.

Le problème ici présente une facette économique : par exemple, l'apparition de « mauvaises herbes » résistantes au glyphosate obligera sans doute à des mesures coûteuses pour les éliminer, et ce sont là encore des coûts externes, non supportés par les producteurs qui utilisent ce produit à l'heure actuelle : il y aurait lieu de tenir compte de ce phénomène dans le modèle dont il a été question plus haut... Mais il s'agit surtout d'un problème moral, lié à la répartition des risques entre les deux situations « avec » et « sans » pesticides. En effet, même si le nombre et l'ampleur des sinistres sont moins grands dans la situation « avec » que dans la situation « sans », ce ne sont pas les mêmes personnes qui sont touchées. Il en résulte un problème de justice : pour supprimer le risque supporté par Paul et par Jacques, peut-on infliger un risque équivalent à Pierre qui n'y était pas soumis ? Une telle question échappe à l'économiste⁷. Par ailleurs, elle dépasse largement la question des pesticides et intéresse en fait tout changement technique.

On me permettra cependant une réflexion à ce sujet : l'exposition aux risques (parfois mortels) est consubstantielle à la vie ; chaque fois que je traverse la rue, je prends un risque pour moi-même, et aussi pour d'autres, car mon imprudence peut entraîner des conséquences en cascade. Lorsque les probabilités sont faibles, et les risques communément acceptés (comme celui que l'on prend en traversant la rue), ne peut-on admettre que, là encore, une

sorte de principe coût-bénéfice étendu puisse s'appliquer au point de pouvoir considérer comme « moral » d'exposer certains à un (faible) risque de cancer pour éviter à d'autres (souvent, des pauvres) un risque de paludisme ou de dénutrition ? Je me garderais de trancher⁸, mais il est de fait que, depuis l'origine des temps, et grâce au progrès technique, la durée de la vie humaine s'allonge, cependant que la prise en charge des soins post-accidentels s'améliore. Cela signifie que, globalement, les risques de toute sorte ont tendance à diminuer, et cela, grâce au progrès technique. Faut-il alors interdire, ou du moins ralentir une telle évolution au nom d'un « principe de précaution » mal compris ?

Références

- Beck U. 2001. *La Société du Risque*, Paris, Aubier ; Traduit de *Risikogesellschaft - Auf dem Weg in eine andere Moderne*. Suhrkamp, Frankfurt a.M, 1986.
- Bourguet D, Guillemaud T. 2016. The Hidden and External Costs of Pesticides Use, *Sustainable Agriculture Review*, 19 , 35-120.
- Boussard JM, Gérard F, Piketty MG. 2005 *Libéraliser l'agriculture ? Théorie, modèles et réalités*. Editions du CIRAD, Paris.
- Dupuy JP. 2004. *Pour un catastrophisme éclairé*, Seuil , Paris.
- Hertel T (ed.). 1999. *Global trade analysis*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Jungbluth F. 1996. Crop protection policy in Thailand: economic and political factors

⁷ Ulrich Beck (2001) en fait un tableau fascinant sous l'angle sociologique.

⁸ Le sujet est abordé en particulier par Dupuit (Dupuit, 2004), ainsi que par Catherine et Raphaël Larrère (Larrère, 1997).

Analyses d'ouvrages/Text Commentary

influencing pesticide use. *Pesticide Policy Project special issue publication series N° 5*, University of Hannover.
Larrère R, Larrère C. 1997. *Du bon usage de la nature*, Aubier, Paris.
Sen A, Dasgupta P. 1972. *Guidelines for Project Evaluation*, UNIDO, Genève.
Sheets TJ, Pimentel D. (eds). 1979. *Pesticides: their contemporary roles in agriculture, health, and the environment*. The Humana Press, Clifton, 97–149.
Little IAD, Mirelees JA. 1969. *Manual of Industrial Projects Analysis in Developing Countries*, OCDE, Paris.
Meade JE. 1952. External Economies and Diseconomies in a Competitive Situation, *The Economic Journal*, 62 (245), 54-67.
Wescott P, Hansen J. 2016. *Long-term Projections*, USDA, Washington.

Reçu:

2 avril 2015

Accepté:

9 avril 2016

Publié :

11 mai 2016

Citation:

Boussard JM. 2016. *A propos des coûts externes des pesticides / About the external costs of pesticides*, Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / *Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF)*, 1(1), 1-7.
<https://doi.org/10.58630/pubac.not.a113501>

Édité par :

Hervé This
AgroParisTech-Inrae International Centre for Molecular Gastronomy, Paris, France

Rapporteurs :

Bernard Le Buanec, Membre de l'Académie d'agriculture, France
Dominique Job, CNRS, France
Nadine Vivier, Université d'Orléans, France
Philippe Lacombe, ancien directeur scientifique de l'INRA.

Rubrique :

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



Jean-Marc Boussard, né en 1937, est membre de l'AAF depuis 1992. Ancien directeur de recherche en économie à l'INRA, il a fait partie de nombreux comités d'experts internationaux. Il est en particulier un des auteurs d'un guide de l'OCDE sur l'évaluation des projets d'irrigation.

De quelques molécules odorantes

On some odorant compounds

Hubert Richard

Correspondance :

drahcir38hh@orange.fr

Résumé : La détection et l'identification des composés odorants a considérablement progressé, dans les dernières décennies. Ces avancées analytiques ont conduit au développement d'une branche de la parfumerie : l'aromatique.

Abstract: The detection and identification of odorant compounds made considerable advances, in the last decades. These advances led to the development of a branch of the perfume industry : aromatics.

Introduction

Pour préserver ou améliorer les qualités organoleptiques des produits industriels, les firmes alimentaires sont obligées d'avoir recours à des préparations élaborées à partir d'extraits végétaux et de composés de synthèse presque toujours identiques aux produits odorants naturels. C'est ainsi qu'est née en parallèle de la parfumerie, la branche de l'industrie de l'aromatique, qui fabrique des compositions odorantes prêtes à l'emploi pour l'aromatization des aliments.

Depuis plusieurs décennies, les innombrables études scientifiques et technologiques sur les arômes ont conduit à des résultats qu'il est vain de vouloir

décrire dans une note académique de taille raisonnable. Aussi avons-nous choisi de prendre quelques exemples qui nous ont paru importants, et dont nous donnons ici une « histoire naturelle ».

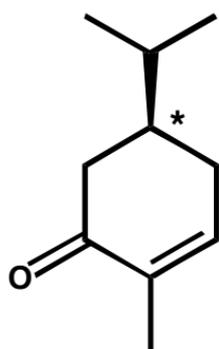
Nous percevons chaque composé odorant ou mélange de composés odorants, aussi complexe soit-il, comme une image. Il nous est donc impossible de dire si nous venons de sentir un composé pur ou un ensemble de composés. Lorsque nous décrivons nos perceptions olfactives, obtenues par voie directe (odeur) ou par voie rétro-nasale (« arôme »), nous utilisons des termes représentatifs de produits que nous connaissons et dont nous avons mémorisé l'odeur. Les molécules des centaines de composés purs volatils présents dans un produit et perçues au même instant ne vont donner qu'une image, celle du produit, que nous associons à un message hédonique de plaisir ou de danger. Parmi l'ensemble de ces composés, un seul (souvent le plus abondant, mais pas toujours) peut évoquer le produit pour un ensemble d'individus, mais la règle n'est pas générale, car les appréciations de l'univers sensoriel diffèrent selon les individus.

Un des exemples les plus connus est celui des deux carvones. La (R)-(-)-carvone rappelle, pour 80 % des individus, l'odeur

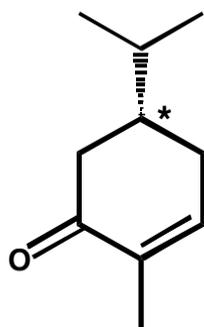
Note de synthèse / Review

de la menthe crépue, tandis que 20 % des individus ne distinguent pas ce composé de son énantiomère, la (S)-(+)-carvone, principal composé du carvi. Pourtant, si l'on fait sentir une huile essentielle de menthe douce à ceux qui confondent les deux carvones, ils identifieront sans problème l'odeur de la menthe crépue et ne la confondront pas avec celle du carvi. La (R)-(-)-carvone à elle seule ne peut représenter la plante dont elle est issue.

Cette constatation est bien connue des aromaticiens, qui, dans l'élaboration de leurs compositions aromatiques, s'inspirent de ce que fait la nature et utilisent avec libéralité la redondance. Ainsi, pour obtenir la note verte d'une pomme, ils n'hésitent pas à inclure dans leur formulation plusieurs molécules possédant cette caractéristique de verdeur. « Lorsqu'on voit des aromaticiens qui écartent certaines molécules jugées similaires en s'obligeant à un choix héroïque entre deux composés chimiques présentant des notes proches, on reste confondu » (Chataignier et Richard, 2003).



(S)-(+)-carvone



(R)-(-)-carvone

Aussi, dans ce qui suit, faut-il prendre avec un certain recul la description de l'odeur qui est faite de chaque composé, cette description étant variable selon les

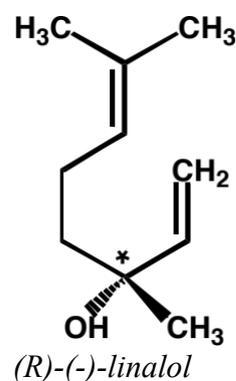
observateurs. En réalité, la carvone sent la carvone, et non la menthe douce (Richard et Hossenlopp, 2006).

1. Les alcools monoterpéniques

Les alcools monoterpéniques sont des composés volatils à dix atomes de carbone que l'on rencontre très fréquemment dans les huiles essentielles de plantes. Ils dérivent de la bio-synthèse du phosphate d'isopentényle, lui-même élaboré à partir de l'acétyl co-enzyme A (Lamarti *et al.*, 1994).

Ils possèdent des odeurs, le plus souvent florales et très agréables.

1.1.- Linalol



(R)-(-)-linalol

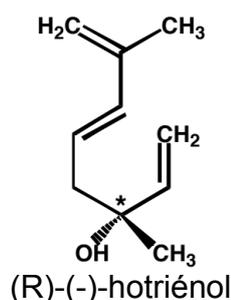
Le linalol, ou 3,7-diméthyl-1,6-octadién-3-ol, est un indicateur de la qualité des huiles essentielles de lavande et de lavandin grosso. A ce titre, son dosage permet de suivre les bonnes pratiques de distillation (Pichard *et al.*, 1986). Le linalol est peu soluble dans l'eau. Il en existe deux énantiomères possédant une odeur florale rappelant le muguet, le petit-grain avec un caractère épicé.

Le linalol est très répandu dans la nature, où il est bio-synthétisé par plus de 200

Note de synthèse / Review

espèces de plantes. C'est le composé majoritaire des huiles essentielles de graines de coriandre (*Coriandrum sativum* L.), très utilisées dans l'aromatization des champignons à la grecque. On le retrouve dans les essences de bois de rose, de cannelle, de poivre, de basilic doux (*Ocimum basilicum* L.), de Citrus (Fleurs d'orange douce) et même chez certains champignons comme le clitocybe nébuleux (Audouin *et al.*, 1989). Le linalol est peu toxique, mais peut avoir chez certaines personnes des effets allergisants.

1.2.- Hotriénol



Le hotriénol joue un rôle clef dans l'aromaticité et la typicité de divers vins. Avec le linalol, l' α -terpinéol, le nérol, le géraniol et le citronellol, il participe à la forte aromaticité des vins issus des cépages de muscat (muscat à petits grains et muscat d'Alexandrie...) et des cépages alsaciens (Riesling, Pinot gris et Gewurztraminer).

Or, il arrive que certaines mauvaises années, les vins de muscat présentent une faiblesse sur le plan aromatique. Il est alors tentant de vinifier les raisins en ajoutant dans les cuves de fermentation des fleurs de sureau séchées dont les arômes renforcent la note « muscat ». Cette pratique est bien connue et légale en Italie avec les moscatels. Elle est rigoureusement interdite en France.

L'utilisation de fleurs de sureau en vinification est considérée comme une fraude.

Initialement le problème posé était de savoir si nous retrouvions, dans les huiles essentielles de fleurs de sureau séchées, les mêmes composés que dans les raisins de muscat et si l'on pouvait relever des différences. C'est ainsi qu'un travail préalable sur l'identification du hotriénol dans les huiles essentielles extraites du muscat de Frontignan (Bayonove *et al.*, 1976) fut à l'origine de l'étude des composés volatils de la fleur de sureau. Par cette étude (Toulemonde et Richard, 1983), tous les alcools terpéniques du muscat ont pu être identifiés, ce qui justifie la pratique italienne. Ce travail a aussi permis de déterminer, à partir de l'analyse des composés volatils mineurs, les fraudes éventuelles sur les vins de muscat français.

Ce composé ou (5E)-3,7-dimethylocta-1,5,7-trien-3-ol doit son nom au camphrier, ou Ho, dont il a été extrait des feuilles. Il possède une odeur florale rappelant le tilleul.

1.3. Bornéol



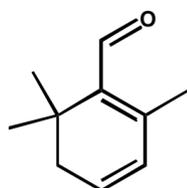
Rechercher et doser un composé particulier est un moyen efficace pour détecter des pratiques illégales. Ainsi, sur le marché français, le thym de Provence (*Thymus vulgaris* L.) fut l'objet de fraudes. Pour identifier les délinquants, le

Note de synthèse / Review

laboratoire de la Direction Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes (DGCCRF) effectuait à l'époque un contrôle de la qualité en réalisant un tri du matériel végétal sous loupe binoculaire. Cette méthode longue et fastidieuse était totalement inefficace lorsque le thym de Provence se trouvait sous forme pulvérulente. La fraude consistait à remplacer totalement ou partiellement le thym de Provence par du thym du Maroc, *Thymus satureioides*, bien moins cher. Or l'huile essentielle de ce dernier thym possède des teneurs en bornéol variant entre 20 et 27 %, bien supérieures à celles de l'huile essentielle de thym de Provence. Le dosage du bornéol fut un bon moyen pour détecter ce type de fraudes (Miquel *et al.*, 1976), quelle que soit la forme sous laquelle était commercialisé ce produit. Le bornéol ou camphre de Bornéo est un alcool terpénique solide qui s'oxyde assez facilement en camphre. Son goût est décrit comme brûlant et rappelant la menthe.

2. Les aldéhydes et cétones monoterpéniques

2.1. Safranal

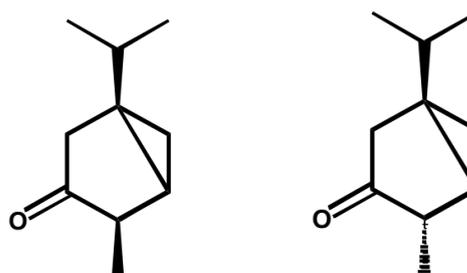


Autre exemple de fraude et non des moindres, celle du safran, épice la plus chère au monde. Une des pistes de recherche pour identifier les fraudeurs fut

de mettre au point des analyses simples permettant de déterminer la teneur en composés caractéristiques de cette épice (Giampaoli *et al.*, 1993). Ce travail fut facilité par les publications de Zarghami et Heinz (1971), qui avaient isolé et identifié la plupart des composés volatils du safran. Ils avaient également montré que le safranal, composé majoritaire responsable de la typicité de l'arôme du safran, se développe au cours du séchage à partir d'un précurseur glycosidique, la picrocrocine.

Dire que le safranal possède une odeur de safran est peu original. La teneur du safran en composés volatils étant très faible, de l'ordre de 5 g/kg de stigmates de safran, il n'existe pas sur le marché d'huile essentielle de safran dont le prix serait exorbitant (autour de 500 000 €/kg). Aussi toutes les préparations aromatiques sont élaborées à partir de safranal de synthèse peu cher, habillé de quelques autres molécules.

2.2. α -thuyone et β -thuyone



(-)- α -thuyone (+)- β -thuyone

Devant la grande diversité des huiles essentielles d'armoise blanche du Maroc, dont certaines n'avaient pas grand intérêt auprès des parfumeurs, une étude systématique des peuplements d'*Artemisia herba-alba* fut entreprise (Benjilali *et al.*, 1985). Ce travail permit de caractériser, au sein de cette espèce

Note de synthèse / Review

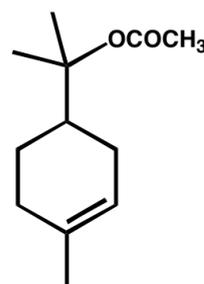
d'armoise, toute une série de chémotypes, dont certains riches en α - et β -thuyones, cétones terpéniques que l'on trouve en quantité abondante dans toutes les différentes espèces d'armoises, ainsi que dans le génépi, la tanaïsie et la sauge.

Ces composés qui marquent fortement l'odeur de ces plantes, présentent une certaine neurotoxicité. Rappelons que la législation européenne en limite actuellement la teneur à 35 mg/kg dans les boissons alcoolisées. Au début du XX^{ème} siècle, pour lutter contre l'alcoolisme ces deux cétones ont pu servir de boucs émissaires pour rassurer les bouilleurs de cru. L'alcoolisme n'existait pas, les problèmes venaient de ces deux malheureuses thuyones ! C'est ainsi que l'absinthe ou fée verte élaborée à partir de deux plantes riches en ces cétones, *Artemisia absinthium* (Grande absinthe) et *Atemisia pontica* (Petite absinthe) fut condamnée.

phénomènes d'hydrolyse. Dans le cas de la fabrication des huiles essentielles de lavandin grosso, pour déterminer l'ampleur de cette dégradation, il suffit de suivre l'évolution de l'acétate de linalyle au cours de l'entraînement à la vapeur d'eau et de sa transformation en linalol. Plus la teneur en acétate de linalyle est élevée, meilleures sont les essences de lavande (Pichard *et al.*, 1986).

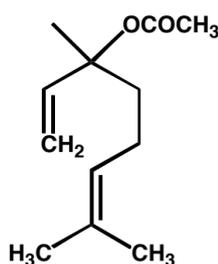
L'acétate de linalyle possède une odeur douce et florale qui rappelle un peu le parfum des champs de lavande.

3.2. Acétate d' α -terpényle



3. Les esters monoterpéniques

3.1. Acétate de linalyle



Acétate de linalyle

Dans l'obtention d'huiles essentielles, l'hydrodistillation est une des techniques les plus utilisées. Or elle n'est pas sans inconvénient : notamment elle modifie la composition de l'essence recueillie par des

La cardamome verte, *Elettaria cardamomum* Maton, est une épice dont la teneur en huile essentielle est très élevée, de l'ordre de 8 %. L'essence possède des propriétés odorantes et une note de fraîcheur très intéressante, proche de celle d'une menthe crépue. Le composé associé à cette perception trigéminal est un ester, l'acétate d' α -terpényle, responsable du caractère olfactif dominant de cette épice. Il fait partie d'un ensemble de molécules caractéristiques des notes de fraîcheur : menthol, eucalyptol, camphre...

Dans les huiles essentielles de cardamome verte, la concentration en acétate d' α -terpényle est élevée, entre 20 et 50 % (Noleau *et al.*, 1987).

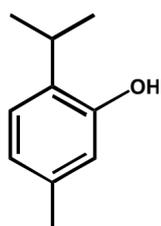
Note de synthèse / Review

4. Les phénols monoterpéniques, thymol et carvacrol

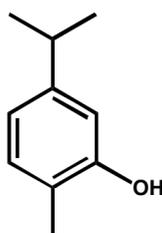
Les thyms et les origans sont des plantes très répandues sur tout le pourtour du bassin méditerranéen. Elles sont utilisées depuis des temps immémoriaux pour leurs propriétés anti-oxydantes et bactéricides en parfumerie, en cosmétologie, en aromathérapie et, bien-entendu, par l'industrie de l'aromatique.

Leurs extraits ont fait les beaux jours de la pharmacopée au Moyen-Âge et jouissent encore, de nos jours, d'une grande popularité dans de nombreux sirops pour la toux. Ces propriétés sont liées à la présence de deux phénols monoterpéniques, le thymol et le carvacrol. Ces deux phénols, dont la teneur dans les huiles essentielles est variable selon les espèces et les lieux de récolte, ont été caractérisés dans diverses huiles essentielles (Richard *et al.*, 1985 ; Benjlali *et al.*, 1986) : certains chémotypes de thym de Provence (*Thymus vulgaris*) et de thym du Maroc (*Thymus zygis*), origans (*Origanum vulgare* L. et *Origanum compactum* Benth. *Origanum elongatum* Emb. et Maire ou « thym de Terguiste), marjolaine (*Origanum majorana* L.) et monarde (*Monarda didyma* L.).

La solubilité du thymol et du carvacrol dans l'eau est faible, de l'ordre d'un gramme par litre d'eau, alors qu'ils se dissolvent très bien dans l'alcool éthylique, les huiles et les graisses.



Thymol

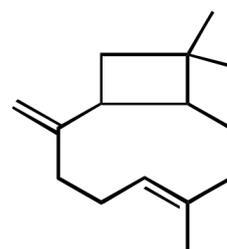


Carvacrol

Ces deux phénols ont une odeur médicinale, herbacée rappelant le thym avec des notes âcres et piquantes en bouche.

5. Les composés sesquiterpéniques

5.1. Un hydrocarbure, le β -caryophyllène

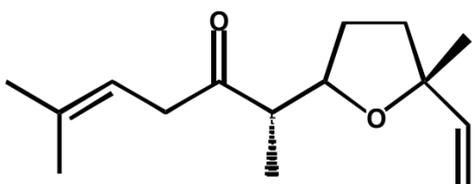


Le poivre est l'épice la plus répandue, et peut-être, cependant la moins connue. Selon les pratiques culturales et les techniques de transformation et de séchage, cette espèce, (*Piper nigrum* L.) donne des produits dont les qualités organoleptiques sont des plus variables, tant sur le plan du piquant et du brûlant que sur l'aspect odorant et aromatique.

La composition des huiles essentielles des différents crus de poivre montre une diversité étonnante (Richard *et al.*, 1971). Leur point commun est une richesse en hydrocarbures monoterpéniques et sesquiterpéniques. Parmi ces composés, le β -caryophyllène est le composé le plus abondant, sa teneur variant selon les origines du poivre entre 10 et 30 %. L'odeur de ce composé rappelle un peu celle de la carotte. Il joue vraisemblablement un rôle important dans la perception de l'odeur des poivres. Cependant, à ce jour, on ne connaît pas de molécule typique de la note de poivre. Il est fort probable que ce caractère résulte de l'association de plusieurs composés odorants.

Note de synthèse / Review

5.2. Une cétone, la davanone

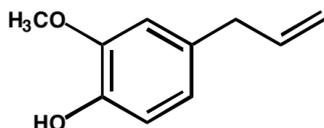


Dans les études des divers peuplements d'armoise blanche du Maroc, *Artemisia herba-alba*, un chémotype particulier a été découvert sur les pentes du Saghro, dans le Haut-Atlas, en altitude supérieure à 2000 mètres. Son huile essentielle contient de fortes teneurs en davanone, comprises entre 20 et 70 % (Benjilali *et al.*, 1985).

La davanone est une cétone sesquiterpénique qui intéresse particulièrement les parfumeurs et l'industrie du tabac. Son odeur épicée, peu puissante mais très persistante rappelle quelque peu celle de l'armoise avec des notes boisées et de foin.

6. Les composés du métabolisme de la phénylalanine

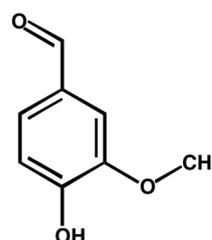
6.1. Eugénol



L'eugénol est le principal composé odorant du clou de girofle. On le retrouve en forte proportion dans l'huile essentielle extraite des feuilles du cannellier et dans une épice, le piment de la Jamaïque (*Eugenia pimenta* de Candolle), que l'on dénomme encore « Tout épice », car son arôme rappelle à la fois le clou de girofle, le poivre, la muscade et la cannelle (Richard, 1991 ; Hossenlopp et Richard, 2003).

L'eugénol est un composé doté de propriétés anti-oxydantes et d'un fort pouvoir antiseptique, mis à profit par les dentistes. Sa puissante odeur implique un dosage rigoureux si l'on veut éviter qu'il ne domine dans l'aromatization d'un plat. Sa teneur se situe entre 80 et 90 % dans les huiles essentielles de clou de girofle qui est l'épice la plus riche en essence (150 g/kg de clou de girofle).

6.2. Vanilline



La vanilline, ou 3-méthoxy-4-hydroxybenzaldéhyde, est le principal composé odorant parmi le grand nombre de composés volatils - plus de 150 - qui constituent l'arôme de la gousse de vanille. A température ambiante, la vanilline est un solide. Elle peut donner, à la surface des gousses, de petits cristaux blancs. On dit que la gousse a givré. La teneur en vanilline des gousses se situe entre 2 et 4 %.

Quand on pense qu'au milieu du XIXe siècle, on n'exploitait ni cette molécule, ni l'épice, il est surprenant de voir combien la vanilline et les extraits de vanille sont devenus indispensables dans l'aromatization de nombreux aliments (chocolat, crèmes en tous genres, yaourts, biscuits, viandes et poissons...), de boissons, de tabacs, dans la création de parfums et cosmétiques. Or, la production très locale de gousses de vanille et d'extraits obtenus à partir des gousses ne peut satisfaire qu'un dixième des

Note de synthèse / Review

demandes. Si bien que ce sont les préparations aromatiques élaborées à partir de vanille de synthèse ou d'un substitut, l'éthylvanilline, qui fournissent l'essentiel du marché. Le synthétique côtoie le naturel et, compte tenu des différences de prix, les fraudes se sont longtemps multipliées avant le développement des méthodes d'analyse par résonance magnétique nucléaire (Remaud *et al.*, 1994).

Les cristaux blancs de vanilline, faiblement solubles dans l'eau, se dissolvent bien dans l'alcool éthylique, dans les huiles et les graisses. Ils possèdent une odeur agréable, douce, typique de la vanille, présentant toutefois des nuances médicinales (Arctander, 1969). Sur le plan olfactif, les meilleurs extraits sont ceux obtenus par extraction au dioxyde de carbone à l'état supercritique (Vidal *et al.*, 1989). Ils ont cependant l'inconvénient d'être difficiles à disperser ultérieurement dans un milieu alimentaire.

Conclusion

La plupart des travaux cités dans cet article appartiennent à la période faste au cours de laquelle l'identification de nouvelles molécules odorantes dans les produits alimentaires battait son plein. D'immenses progrès dans la connaissance de la composition des arômes furent réalisés. Avant 1965 nous connaissions à peine une dizaine de composés volatils dans le poivre noir, et 30 ans plus tard leur nombre dépassait largement la centaine de molécules. Au cours de ces années, le gigantesque bond en avant a résulté du développement de la chromatographie en phase gazeuse, des spectrométries de masse, infra-rouge et de résonance

magnétique nucléaire à transformée de Fourier. Dès qu'apparurent les techniques de couplage, en particulier celle de la chromatographie en phase gazeuse et de la spectrométrie de masse, et grâce aussi à l'extraordinaire développement des outils informatiques, l'analyse de la composition d'une huile essentielle prit un essor considérable. Dans les années 1970, déterminer la composition de l'huile essentielle d'une épice faisait l'objet d'une thèse, travail qui aujourd'hui prend moins d'une heure. Un ouvrage régulièrement réactualisé (Maarse et Visscher, 1994) rassemble les données de la composition en composés volatils de la plupart des aliments et donne une idée de la masse impressionnante de connaissances acquises en une trentaine d'années.

Les recherches dans le domaine des arômes évoluent. Maintenant, il s'agit plutôt de comprendre les relations de ces composés olfactifs entre eux, de leur impact olfactif en mélange et au sein de milieux divers. Parmi les retombées envisagées, on peut espérer améliorer nos connaissances relatives aux lois des mélanges, mieux prendre en compte l'aspect aromatique dans les sélections variétales, réduire considérablement l'empirisme dans la formulation d'arômes, mieux appréhender la perception des molécules odorantes, suivre leur devenir au cours des divers traitements technologiques et ainsi pouvoir mieux maîtriser la qualité organoleptique de nos préparations alimentaires.

Références bibliographiques

Arctander S. 1969. *Perfume and flavor chemicals (Aroma chemicals)*. Montclair, N.J. (USA).

Note de synthèse / Review

- Audouin P, Vidal JP, Richard H. 1989. Composés volatils de l'arôme de quelques champignons sauvages comestibles : la morille (*Morchella conica*), le pied bleu (*Lepista nuda*), le clitocybe nébuleux (*Clitocybe nebularis*) et le clitocybe orangé (*Hygrophoropsis aurantiaca*), *Science des aliments*, 9, 185-193.
- Bayonove C, Richard H, Cordonnier R. 1976. Isolement et identification du diméthyl-3,7 octatriène-1,5,7 ol-3 constituant à odeur de tilleul de l'huile essentielle de muscat de Frontignan. *C.R. Acad. Sc.*, Paris, 283, 549-551.
- Benjlali B, Richard H. Liddle P. 1985. Chemotypes d'Armoise blanche du Maroc, *Artemisia herba-alba*, Artemizie Ricerca e Applicazione. Saint-Vincent (Italia) 26-27 aprile 1984. 2. *Supplemento al « Quaderno Agricolo »*, 131-151
- Benjlali B, Richard H, Baritoux O. 1986. Etude des huiles essentielles de deux espèces d'Origan du Maroc : *Origanum compactum* Benth. et *Origanum elongatum* Emb. et Maire. *Lebensm.- Wiss. U.- Technol.*, 19, 22-26.
- Chataigner Y, Richard HMJ. 2003. Formulation d'arômes : une expérience pédagogique. *Sciences de l'aliment*, 23(3), 331-348.
- Giampaoli P, Petrov M, Thiercelin JM, Richard H. 1993. Etude de la fraction aromatique de safran de diverses origines. Actes des XIèmes Journées Internationales Huiles Essentielles, Digne-les-Bains, Septembre 1992. *Rivista Italiana EPPOS*, N° spécial, 615-621.
- Hossenlopp J, Richard H. 2003. Le monde merveilleux des molécules odorantes dans les aliments. *Découverte*, 311, 14-25.
- Lamarti A, Badoc A, Deffieux G, Carde JP. 1994. Biogénèse des monoterpènes. II- La chaîne isoprénique. *Bull. Soc. Pharm. Bordeaux*, 133, 79-99.
- Maarse H, Visschne RCA. 1994. Volatile compounds in foods. Qualitative and quantitative data. TNO – CIVO, *Food Analysis Institute, Zeist, Pays-Bas*.
- Miquel J, Richard HMJ, Sandret FG. 1976. Volatile constituents of Moroccan Thyme oil. *Agric. Food Chem.*, 24, 833-835.
- Noleau I, Toulemonde B, Richard H. 1987. Volatile constituents of Cardamom (*Ellettaria cardamomum* Maton) cultivated in Costa-Rica. *Flavour Fragrance J.*, 2, 123-127.
- Pichard H, Touche J, Morin P, Richard H. 1986. Extraction par entraînement à la vapeur d'eau de l'huile essentielle de Lavandin. Influence de la pression sur la cinétique d'extraction. *Cahiers C.E.A.M.S.*, 2, 118-131.
- Remaud G, Martin G, Martin GJ, Richard H. 1994. Characterization of the natural origin of saffron oil by the SNIFF-NMR method. *Actes des XII° Journées Internationales Huiles Essentielles*, Digne-les-Bains, 2-4 septembre 1993, n° spécial, 369.
- Richard H, Russell GF, Jennings WG. 1971. The volatile components of black pepper varieties. *J. Chromatogr. Sci.*, 17, 560-566.
- Richard H. 1991. Spices and condiments.

Note de synthèse / Review

In Maarse H (ed) *Volatile compounds in Foods and Beverages*. Marcel Dekker, New-York, Chapter 12, 411-447.

Richard H, Benjilali B, Banquour N, Baritoux O. 1985. Etude de diverses huiles essentielles de Thym du Maroc. *Lebensm.-Wiss. U.- Technol.*, 18, 105-110.

Richard H, Hossenlopp J. 2006. Constituants des arômes : chimie et perception. *Industries Alimentaires et Agricoles*, 123, *Dossier spécial arômes alimentaires : réglementation, tendances, constituants, assurance qualité*, 6, 20-29.

Toulemonde B, Richard H. 1983. Volatile constituents of dry elder (*Sambucus nigra* L.) flowers. *J. Agric. Food Chem.*, 31, 365-370.

Vidal JP, Fort JJ, Gaultier P, Richard H. 1989. Vanilla aroma extraction by dense carbon dioxide. *Sci. Alim.*, 9, 89-100.

Zarghami NS, Heinz DE. 1971. The volatile constituents of saffron. *Wiss. Technol.*, 4, 43-45.

Wescott P, Hansen J. 2016. *Long-term Projections*, USDA Washington.

Edité par :

Hervé This,
AgroParisTech-Inra International Centre for
Molecular Gastronomy, Paris,
France

Rapporteurs :

1 Pierre Giampaoli, Professeur de chimie
des arômes, AgroParisTech, France
2. Dominique Job,

Membre de l'Académie d'agriculture de France

Rubrique :

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

Reçu :

27 avril 2015

Accepté :

7 mai 2016

Publié :

11 mai 2016

Citation :

Richard H. 2016. De quelques composés
odorants / *On some odorant compounds*.
*Notes Académiques de l'Académie
d'agriculture de France / Academic Notes
from the French Academy of Agriculture*,
3, 1-10. [https://doi.org/10.58630/
pubac.not.a958199](https://doi.org/10.58630/pubac.not.a958199)



Hubert Richard a été professeur de chimie
des substances naturelles à l'Ecole
nationale supérieure des industries
agricoles et alimentaires (ENSIA), intégrée
au sein d'AgroParisTech, spécialiste des
composés odorants.

“Maillard products” and “Maillard reactions” are much discussed in food science and technology, but do such products and reactions deserve their name?

Hervé This^{1,2}

1 UMR GENIAL, AgroParisTech, Inra, Université Paris-Saclay, 91300 Massy, France

2 Groupe de gastronomie moléculaire, Inra-AgroParisTech International Centre for Molecular Gastronomy, F-75005, Paris, France

Correspondance :
herve.this@inrae.fr

Résumé

Alors que le nombre de publications scientifiques et technologiques consacrées aux « réactions de Maillard » augmente, en raison de l'importance des brunissements non enzymatiques lors de la production des aliments, les expressions « réaction de Maillard » ou « produits de Maillard » restent vagues. Une étude historique des travaux relatifs aux réactions des sucres et des composés contenant un groupe amine montrent que seules les condensations de sucres réducteurs, d'une part, et de peptides ou protéines, d'autre part, mériteraient de recevoir le nom de Maillard... si la dénomination internationalement reconnue n'était pas « réactions de glycation ». Surtout, afin de mieux comprendre le schéma réactionnel complexe qui fait suite à cette condensation, il y a lieu de quantifier les divers chemins réactionnels qui conduisent aux nombreux composés finalement engendrés par les diverses voies.

Abstract

Whereas the number of scientific and technical publications dealing with “Maillard reactions” is increasing in food science and technology, in particular due to the importance of non-enzymatic browning during food production, the expressions “Maillard reaction” and “Maillard products” remain vague, and different authors have different definitions. A historical study of the scientific researches on the reactions between sugars, on the one hand, and compounds containing an amino group on the other hand, shows that only the initial condensation of reducing sugars and peptides or proteins should be called Maillard reaction. The complex reaction pattern that follows this initial condensation should be explored more quantitatively, in order to assess the comparative kinetics of the various reaction pathways leading to the numerous compounds which are finally produced.

Mots-clés

Maillard reactions, saccharides, amino acids, peptides, proteins, history, glycation reactions

Keywords:

Maillard, réaction de Maillard, saccharides, acides aminés, peptides, protéines, histoire, réactions de glycation.

Introduction

“Maillard reactions” keep being more and more discussed in food science and medicine, mainly because such chemical processes are partly responsible for the flavour of cooked food, but they also generate compounds with possible toxicity and they are sometimes said to cause nutriment losses. What exactly are these processes? In many scientific and technical publications, there are references to “Maillard products”, but what are these “products”? It is frequently assumed that Maillard reactions are synonymous with non-enzymatic browning reactions, but we shall see that it is not that simple. And because the International Union of Pure and Applied Chemistry decided for “glycation reactions”, the expression “Maillard products” is faulty.

The chemist and physicist Louis Camille Maillard was born in Pont-à-Mousson, France, in 1878, and he died in Paris in 1936 (Rivail, 2005). He began his studies in Nancy, France before moving to Paris, then to Alger. Hagiographic documents indicate that the “Maillard reaction” (or “Maillard reactions”) was (respectively were) discovered by Maillard. They add that these reactions are characterized by a browning of food without any enzyme activity, and are also called “non-enzymatic browning” (Maillard, 2016). This sole characterization is ambiguous, because caramelizations in particular are also non-enzymatic browning reactions (Defaye and Fernandez, 1994), but they were not studied by Maillard and they do not involve amino groups. It is sometimes added, even on university websites and in scientific articles, that Maillard reactions

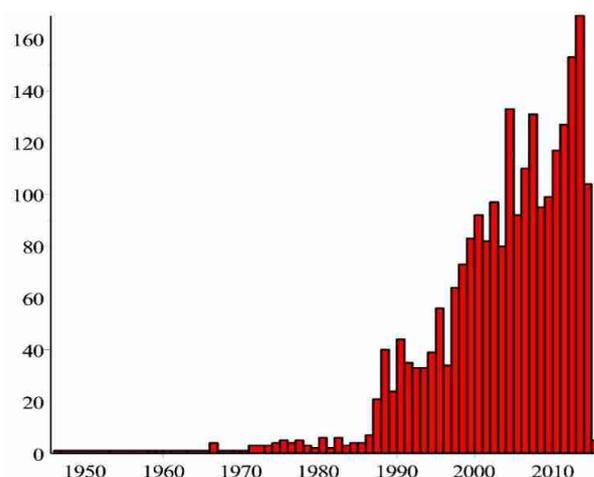


Figure 1. Number of citations of Maillard reactions through PubMed.

occur between “a carbonyl compound, such as a reducing sugar, react with an amine, such as an amino acid, a peptide or a protein” (This, 2002), but clearly the reactions are different when different moieties are involved. A distinction based on temperature can also be found between Maillard browning and caramelization, since the latter occurs between 120 °C and 150 °C whereas Maillard reactions can take place even at room temperature.

A superficial bibliographical research shows some France/UK opposition, with references to A.R. Ling (sometimes said “Ling and Malting”), who, in 1908, wrote that “during beer production, when the temperature is between 120 °C and 150 °C, odor and color are produced; amino acids probably react with sugars”. In some of these scientific publications, the fact that “Ling and Malting” are said to be the authors is particularly odd... since “malting” is only the name of the peculiar process that Ling was discussing, as appears in the right title of his publication: Ling, A.R. 1908. Malting, J. Inst. Brew., 14:494-521 (Ling, 1908).

Regardless, Maillard reactions are very popular today, an international society (IMARS) was formed by scientists and technologists interested in the glycation reactions (IMARS, 2015), and a growing number of scientific publications include

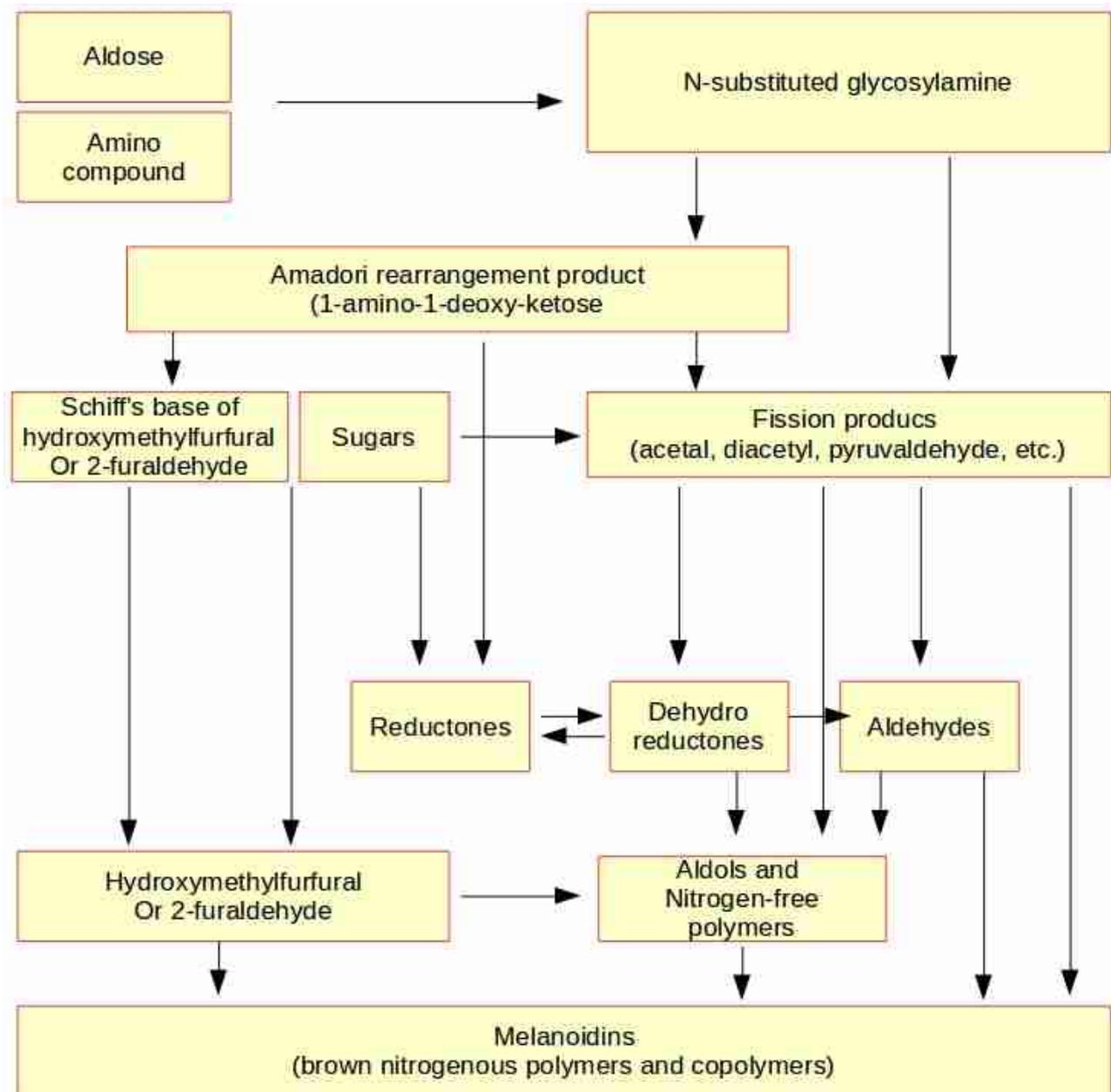


Figure 2. The general scheme of reactions occurring when reducing sugars react with amino compounds (adapted from Hodge, 1953).

“Maillard” in their title or keywords: in July 2015, the Google term search “Maillard reaction” yielded more than 45,000 answers, with more than 2,000 results in 2015 only (Google, 2015). PubMed also showed a large increase in quotations (PubMed, 2015) (Figure 1).

It is often explained that “Maillard reactions” are “a group of complex reactions”, which begins with the condensation of a reducing sugar and an amino acid, followed by a series of rearrangements, and ends with the formation of brown polymers called melanoidins. However,

examining the reaction patterns proposed as early as 1953 by Hodge (Hodge, 1953), Strecker reactions, decarboxylations, reductions, etc. are found along with an initial condensation (Figure 2). Hence the question: what exactly are Maillard reactions? And what are Maillard products? In order to clarify the situation, a serious historical research was made. It shows that our ideas on Maillard reactions and products should change.

Before Maillard

To our best knowledge, the history of Maillard reactions begins in 1866, when Hugo Schiff (1834-1915) published that aldehydes (including sugars) react with amines (including amino acids) to form dark compounds (Schiff, 1866; Qin, 2013). In his article, Schiff discussed D-glucose, aniline and p-toluidine (Figure 3). He proposed the formation of secondary imines (today called Schiff's bases) from aldehydes and aromatic amines. Then, in 1871, R. Sachsse studied the reaction of lactose with aniline (Sachsse, 1871), before Emil Fisher investigated the reactions of sugars and amino compounds in 1884 and 1886 (Fischer, 1884). Fischer focused on the reactions of D-glucose, D-fructose or sucrose with phenylhydrazine. He noted that D-glucose and D-fructose lead to the same compound, and he identified that the reaction of sucrose with phenylhydrazine was producing 1-amino-1-deoxyfructose.

In 1888, B. Sorokin studied the reaction of D-glucose and aniline (Sorokin, 1888), and in 1898 C. A. Lobry de Bruyn obtained D-glucosamine from D-fructose and ammonia; the reaction product was crystallized the same year by Breuer. From those discoveries, one can easily understand how Ling was able, in 1908, to propose a mechanism explaining the observed browning of malts: the reactions of sugars and amino acids were well-known at that time, *i.e.* about 30 years before Maillard published anything on the subject.

Maillard's results

In 1909, J. C. Irvine and R. Gilmour explored

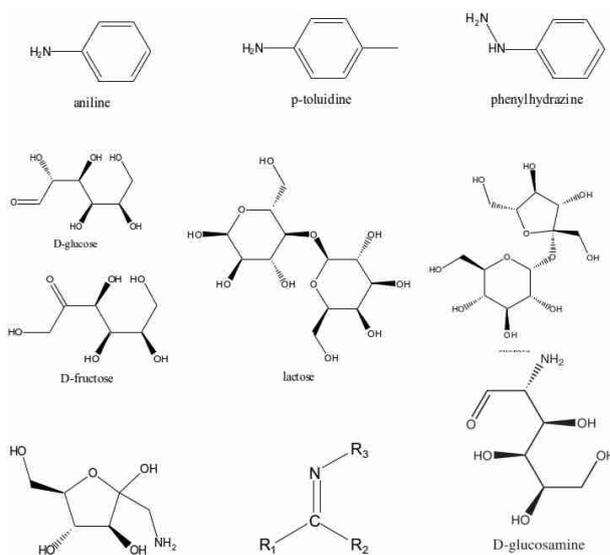


Figure 3. Some compounds which were considered in the history of the discovery of the reactions occurring after the condensation of a sugar and an amino compound.

the reaction of D-glucose and p-toluidine (as Schiff did before them), and Maillard began his studies. They are summarized in his 1913 academic report, under the title *Genèse des matières protéiques et des matières humiques* (Formation of proteic and humic matters) (Maillard, 1912).

In his articles or memoirs, Maillard recognized that his studies did not begin with him (in the following paragraph, a personal translation is given, keeping the old chemical names)¹: "The investigations that are shown in this document, *i.e.* my studies of the phenomena of condensation that α -amino acids undergo in presence of glycerine and sugars, are a small sample of the huge amount of work that has been

1 « Les recherches qui font l'objet du présent mémoire, et dans lesquelles j'ai étudié les phénomènes de condensation de divers ordres que subissent les acides α -aminés en présence de la glycérine et des sucres, ne sont qu'un très petit fragment de la somme énorme de travail qu'ont dû fournir les chimistes, depuis près d'un siècle bientôt, dans l'espoir d'élucider, par la double voie analytique et synthétique, le problème des albuminoïdes. »

performed by chemists, for about half a century, in the hope of solving, by the double way of analysis and synthesis, the issue of albuminoids" (by "albuminoids", Maillard meant proteins).

Indeed Maillard wanted to synthesize proteins²: "The study of the constitution of albuminoid matters, necessary for their synthetic reproduction, began quite early in the history of chemistry. In a few years, it will be one century since H. Braconnot, treating gelatine by concentrated sulfuric acid, could obtain a large quantity of the "sugar of gelatine", which was later recognized to be an amino acid (glycine, then named "*glycocolle*"), the first of a series. By attacking in the same way muscular tissues, Braconnot discovered leucine, less pure than the one we have today, but very important as well as the constitution of albuminoids is concerned. In 1820, H. Braconnot knew the first elements of a series which was later enlarged, both in numbers and function. During the XIXth century, much scientific effort showed finally that the decomposition of proteic matter was yielding more and more compounds that we now know to be amino acids."

However Maillard, who knew the important results from Fischer, wanted to synthesize proteins with

2 « L'étude constitutionnelle des matières albuminoïdes, préface obligatoire de leur reproduction synthétique, remonte assez haut dans l'histoire de la Chimie. Il y a aura dans quelques années un siècle déjà que notre compatriote H. Braconnot (1), en traitant la gélatine par l'acide sulfurique fort, sut obtenir en abondance le « sucre de gélatine », le glycocolle, qui devait être reconnu plus part comme un acide aminé, le type même de la série dont il est le premier terme. En attaquant de la même façon la matière musculaire, Braconnot découvrait la leucine, moins pure sans doute que celle dont nous pouvons disposer aujourd'hui, mais dont l'intérêt n'était pas moins considérable pour la constitution des albuminoïdes. H. Braconnot tenait en 1820 les premiers représentants de la série dont ses successeurs allaient accroître l'importance numérique et fonctionnelle. Au cours du XIX^e siècle se succèdent un grand nombre de recherches où toujours nous voyons la décomposition des matières protéiques fournir plusieurs de ces corps que nous rangeons aujourd'hui dans le groupe des acides aminés. »

softer conditions³: "It is considered nowadays that albuminoid matters are essentially composed, for a main part of their molecule at least, of a grouping of amino acids, linked by dehydration, between the -COOH carboxyl groups and the -NH₂ aminogen groups, *i.e.* by the -CO-NH- link, repeated a certain number of times inside the molecule. The repeated rupture of these -CO-NH-links by hydration leads to the progressive degradation of the albuminoid matter, under the action of reactants or ferments, through various stages of albumoses and peptones, until the last state of simple amino acids. The peptones themselves should be regarded as complex chains of amino acids, a conception that led E. Fischer to propose the name of peptides or polypeptides for the artificial chains of amino acids that Th. Curtius or E. Fischer himself succeeded to create by synthetic processes which will be discussed later."

In the paragraph VI entitled "Researches on the natural mechanisms of protein synthesis in living organisms", Maillard discusses his own results, based on the use of glycerol (called glycerin at that time)⁴: "The method from E. Fischer is both

3 « On considère aujourd'hui les matières albuminoïdes comme formées essentiellement, pour une partie prépondérante de leur molécule tout au moins, d'un semblable entassement d'acides aminés, enchaînés les uns aux autres par déshydratation, entre les groupes carboxyle -COOH et aminogène -NH₂, c'est-à-dire par le chaînon -CO-NH- répété un nombre plus ou moins grand de fois dans l'intérieur de la molécule. C'est la rupture successive de ces chaînons -CO-NH- par l'hydratation, qui produit la dégradation progressive de la matière albuminoïde sous l'action des réactifs ou des ferments, en l'amenant à travers des stades variés d'albumoses et de peptones, jusqu'à l'état définitif de simples aminoacides. Les peptones elles-mêmes doivent donc être considérées comme des chaînes complexes d'acides aminés, et c'est cette conception qui a suggéré à E. Fischer le nom de peptides ou polypeptides pour les chaînes artificielles d'aminoacides que Th. Curtius ou E. Fischer lui-même ont réussi à créer par des procédés synthétiques dont nous dirons plus loin quelques mots. »

4 « La méthode de E. Fischer a pour double

indirect and artificial. It is indirect, because it does not link together a series of preexisting amino acids; but in order to bind the n -th (terminal) amino acid at the end of a chain of rank ($n-1$), it has to bring successively fragments which will make up the molecule only after many reactions. It is artificial, because it uses absolute ethanol, hydrochloric gas, bromine, thionyl chloride, concentrated ammonia, in short a whole set of violent reagents which are not present in the organism of human beings and of other living creatures. Nature makes it very differently. Our organism receives a set of separated amino acids, through digestion; and our intestinal mucosa has to re-associate such amino acids in order to constitute our own albuminoid materials. In order

caractère d'être indirecte et artificielle. Elle est indirecte, car elle ne soude pas ensemble une série d'acides aminés préexistants ; mais, pour construire le n -ième aminoacide à l'extrémité d'une chaîne de rang ($n-1$), elle est obligée d'apporter successivement des fragments qui ne constitueront la molécule de l'aminoacide qu'après un ensemble de réactions. Elle est artificielle, car elle met en jeu l'alcool absolu, le gaz chlorhydrique, le brome, le chlorure de thionyle, l'ammoniaque concentré, bref tout un arsenal de réactifs violents dont ne disposent pas le corps humain ni les autres organismes vivants. La nature procède tout autrement. Notre organisme reçoit une série d'acides aminés séparés les uns des autres par le jeu de la digestion ; et ce sont ces aminoacides entiers que doit réassocier notre muqueuse intestinale pour en constituer nos propres matériaux albuminoïdes. Pour éclairer le mécanisme de ce processus direct et naturel, il est donc indispensable de trouver une nouvelle synthèse des polypeptides qui réponde aux deux conditions suivantes : 1° Partir, non point d'un chlorure d'acide halogéné ou de quelque autre fragment non biologique, mais bien des acides aminés eux-mêmes ; 2° Obtenir l'enchaînement peptidique de ces acides aminés sans recourir à l'intervention d'autres substances que celles dont dispose l'organisme. Tel est le problème auquel je me suis efforcé d'apporter une contribution. J'ai eu la bonne fortune de rencontrer dans une substance très répandue chez les êtres vivants, la glycérine, un agent de condensation qui m'a permis de réaliser déjà la synthèse d'un certain nombre de composés. »

to explain the mechanism of this direct, natural process, it is thus necessary to find a new synthesis of polypeptides with the two following conditions: 1° Start not from an halogenous acid chloride, or from some other non-biologic fragment, but from amino acids; 2° create peptide bonds between these amino acids without using any other substances than the ones the organism can provide. This is the problem that I tried to contribute to. I was lucky to find in a very common biological substance, glycerin, a condensing agent with which I could already synthesize a certain number of compounds."

It is in the fourth part of his report that Maillard discusses the action of sugars on α -amino acids⁵: "In spite of their alcoholic function, the sugars do not behave, toward α -amino acids, as peptidogenic condensing agents, such as glycerin. The presence of the aldehydic (or ketonic) function leads to phenomena of a very different kind. A mixture of *glycocolle* (glycine) and an apparent excess of glucose, in a concentrated aqueous solution heated at 100 ° C, gets brown in minutes, then foams because of an abundant gaseous production, leaving a dark brown amorphous residue, mainly insoluble in water". Maillard had few hints to interpret this phenomenon which, as we could see, was observed well before him. He only wrote: "The primitive reaction can be interpreted as a series of phenomena: a.- Condensation of the amino function of glycoll with the aldehydic function of the sugar; b.- Rupture of the carboxyl; c.- Dehydration eliminating oxydrils and hydrogen atoms from glucose, making double bonds and probably molecular cycles".

5 « Malgré leurs fonctions alcooliques, les sucres ne se comportent pas, vis-à-vis des acides α -aminés, comme des agents de condensation peptidogènes, comparables à la glycérine. La présence de la fonction aldéhydrique (ou cétonique) donne lieu à des phénomènes d'un ordre tout différent. Un mélange de glycocolle avec un excès apparent de glucose, mis en solution aqueuse concentrée et porté à 100 °, brunit au bout de quelques minutes, puis mousse par suite d'un abondant dégagement gazeux, et laisse comme résidu une masse amorphe, d'un brun noir, en grande partie insoluble dans l'eau ».

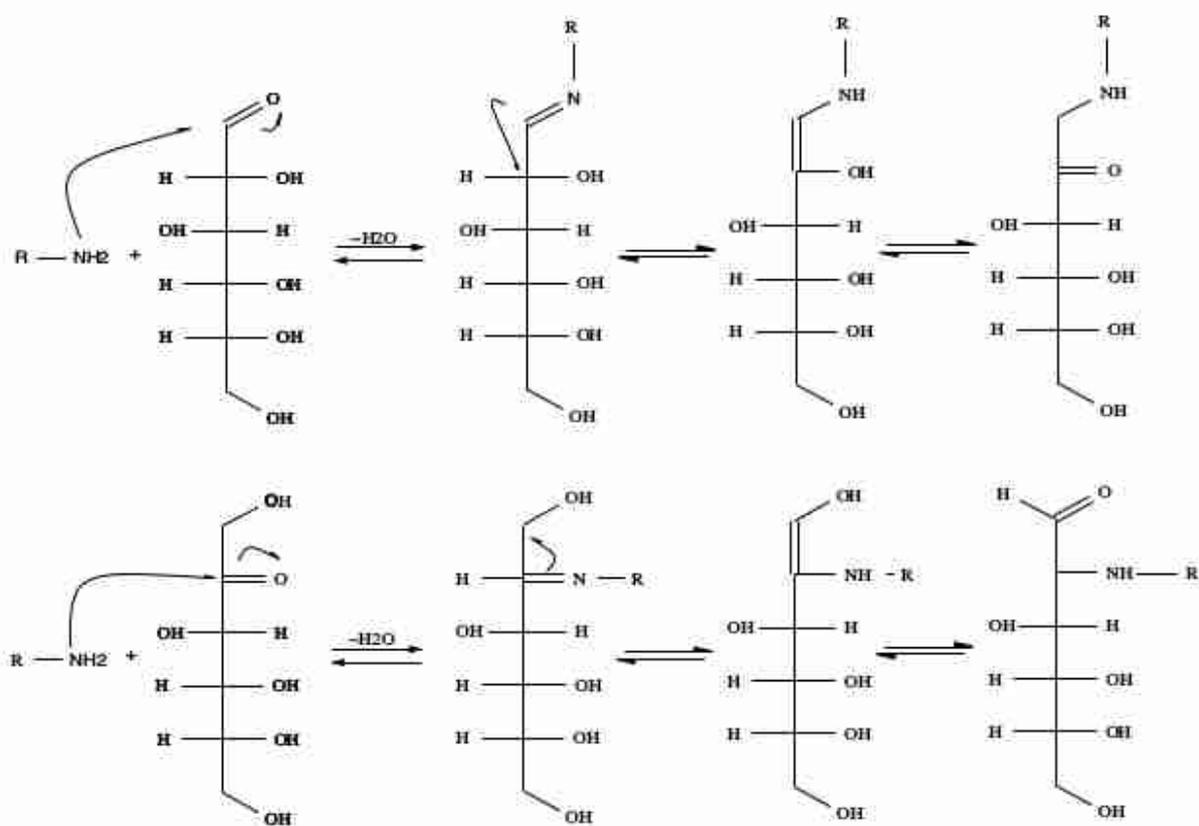


Figure 4. The initial condensation of a sugar and an amino compound.

After Maillard

After Maillard, Mario Amadori (1925-1941) identified the mechanism of the initial condensation of the α -hydroxyaldehydes with amines, leading to aminoketones, according to a mechanism different from the one that Maillard had conjectured (Wrodnigg and Eder, 2001). K. Heyns (whose name is sometimes wrongly written "Heyn") then also showed how hydroxyketones generate 2-amino-2-deoxyaldoses (Kawamura, 1983). The description of the first steps of the set of reactions beginning with the formation of a Schiff's base is now complete (Figure 4), and one can thus decide rationally of the names to be given to different reactions and compounds. Before coming back to the general description of reactions, it is interesting to look again at the general pattern given by Hodge, and to observe that some who say that Maillard reactions are "complex" tried to categorize the various reactions. In particular, it was proposed to group into "chemical pools" the compounds coming from specific precursors, i.e. sugars, amino acids or Amadori or Heyns products (Yaylayan, 1997). However we could see that this does not clarify

the whole pattern, because one must then name "Maillard reactions" the set of reactions, among which some are already known. For example, caramelization (Defaye, 1994), which would be included in the Maillard reactions, is not specific to sugars and amino acids, as well as pyrolysis, hydrolysis, intramolecular dehydration of hexoses, oxidations, Strecker degradation (Belitz and Grosch, 1999)... It was also proposed to distinguish initial, advanced and final Maillard reactions, but we could see that Maillard was unable to distinguish such steps (Eriksson, 1981). Finally some proposed to distinguish "fragmentation pools", but this is improper, as the various reactions following the initial condensation are not only fragmentations, but also condensations. Finally all this shows that we should restrict more than today's use what we call Maillard reactions or Maillard products, instead of enlarging them, and that we should keep in mind that the initial condensation of reducing sugars with amino acids was already known by Schiff, whose name is certainly appropriate for the secondary imines formed initially, whereas the names of Amadori and Heyns are right for the eponymous compounds, because they correctly analyzed them.

Maillard was apparently the first to observe that condensations such as the ones observed by Schiff and others could take place also with peptides, and this should lead us to give the name of Maillard only to such reactions (and also for the condensation of sugars and proteins). For the “Maillard products”, the issue is worse, as the products from the initial condensation already have names (after the chemists who discovered them), and the other products downward also have particular names, including the melanoidins, that Maillard called “brown matter soluble in water”, or “dark matter insoluble in water” (Maillard used the word “melanoidin, introduced by O. Schmiedeberg) (Schmiedeberg, 1897).

How much browning of the various kinds?

Having finally recognized that the name of Maillard should be given only to reactions between reducing sugars and peptides or polypeptides (not to reactions between sugars and amino acids because they were known before him), we can now focus on the scientific issue of understanding why food gets brown when heated. This question is complex when considered as a whole, but it could be made simpler if we consider precise elementary aspects, such as the appearance of the brown color, for example, or how much 5-hydroxymethylfurfural is formed from the initial Schiff's base, or how much melanoidins are formed, etc.

Indeed, concerning browning, many non-enzymatic reactions take place simultaneously, leading to identical or different compounds. It should be noted here that most organic compounds can turn brown through heating, and not only lemon juice from which “invisible ink” is frequently proposed to be made.

How could one control specific brownings, associated with specific compounds and specific food flavors? The question is of technological nature, but even without any application idea its science basis is important, as it covers the competition between different

mechanisms, sometimes from the same reagents (This, 2016 ; This, 2015 a ; This, 2015 b).

As regard to 5-HMF, the question presented above is only given as an example, and it also has some relationship with the browning question. 5-HMF can form through Schiff's condensation, through Maillard reactions, through dehydration from hexoses, from compounds such as cellulose, and more generally during many thermolyses and pyrolyses (Smets et al., 2014; Despax-Machefel, 2013; Lewkowski, 2001; Mednick, 1962). During food thermal processing (“cooking”), how much 5-HMF comes from each reaction?

When mankind is sending probes to Mars, it is strange that we cannot answer such questions. Obviously, more research is needed in order to assess more correctly what are Maillard reactions or products, and what they are not.

References

Belitz HD, Grosch W. 1999. *Food Chemistry*, 2nd ed. Springer, New York. Chapter 4. Carbohydrates, 252-257.

Defaye J, Fernandez JM. 1994. Protonic and thermal activation of sucrose and the oligosaccharide composition of caramel, *Carbohydrate Research*, 256, C1-C4.

Despax-Machefel S. 2013. *Développement de méthodologies de synthèse d'hydroxyméthylfurfural à partir de biomasse lignocellulosique*. PhD Reims-Champagne Ardenne University, December 15th 2013.

Eriksson C (ed). 1981. Maillard Reactions in Food: Chemical, Physiological, and Technological Aspects, *Progresss in Food and Nutrition Science*, Pergamon Press, vol 5.

Fischer E. 1884. *Verbindungen des Phenylhydrazins mit den Zuckerarten*, *Ber. Dtsch. Chem. Ges.*, 17, 579-584.

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

- Google. 2015. https://scholar.google.fr/scholar?q=%22maillard+reaction%22&btnG=&hl=fr&as_sdt=0%2C5 , last access 30 November 2015.
- Hodge JE. 1953. Chemistry of Browning Reactions in Model Systems, *J. Agric. Food Chem.*, 1, 928–943.
- <http://cen.acs.org/articles/90/i40/Maillard-Reaction-Turns-100.html> , last access 14 March 2016.
- IMARS. 2015. <http://www.imars.org/online/> , last access 18 August 2015.
- Kawamura S. 1983. *Seventy Years of the Maillard Reaction, The Maillard Reaction in Foods and Nutrition* (Waller G et al. Eds), *ACS Symposium Series*, American Chemical Society, Washington DC.
- Lewkowski H. 2001. Synthesis, Chemistry and Applications of 5-Hydroxymethyl-furfural and its Derivatives, *ARKIVOC*, 1, 17-54.
- Ling AR. 1908. Malting, *J. Inst. Brew.*, 14, 494-521.
- Maillard LC. 1912. Action des acides aminés sur les sucres. Formation des mélanoidines par voie méthodique, *Compt. Rend.*, 154, 66–68.
- Mednick ML. 1962. The Acid-Base-Catalyzed Conversion of Aldohexose into 5-(Hydroxymethyl)-2-Furfural, *J. Org. Chem.*, 27, 398-403.
- PubMed. 2015. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/?term=%22maillard+reaction%22>, last access 30 November 2015.
- Qin W, Long S, Panunzio M, Biondi S. 2013. Schiff Bases: A Short Survey on an Evergreen Chemistry Tool, *Molecules*, 18, 12264-12289.
- Rivail JL. 2005. *Louis Camille Maillard, "bienfaiteur de l'humanité"*. Communication de l'Académie Stanislas, Nancy, April 15th 2005.
- Sachsse R. 1871. Ueber einige stickstoffhaltige Verbindungen des Milchzuckers von Anilin, *Ber. Dtsch. Chem. Ges.*, 4, 834.
- Schiff H. 1866. Eine neue Reihe organischer Diamine, *Justus Liebigs Ann. Chem.*, 140, 92–137.
- Schmiedeberg O. 1897. Ueber die Elementarformeln einiger Eiweisskörper und über die Zusammensetzung un die Natur der Melanine, *Arch. f. exper. Pathol. u. Pharmacol*, 39, 1.
- Smets K, Schreurs S, Carleer R, Yperman J. 2015. *Valorization of raspberry seed cake by flash and slow pyrolysis: Product yield and characterization of the liquid and solid fraction*. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.jaap.2014.03.01>.
- Sorokin B. 1888. Ueber Anilide der Glycose, *Ber. Dtsch. Chem.*, 19, 513.
- This H. 2002. Molecular gastronomy. *Angew. Chem., Int. Ed. in English*, 41 (1), 83-88.
- This, H. 2015 a. Maillard and grilled steak challenge, *Anal. Bioanal. Chem.*, 407(17), 4873-4875.
- This, H. 2015 b. Solution to Maillard and grilled steak challenge. *Anal. Bioanal. Chem.*, 407(27), 8173-8174.
- This, H. 2016. Combien de produits de Maillard dans un steak ?, *L'Actualité chimique*, 404, 12-15.
- Wrodnigg TM, Eder B. 2001. The Amadori and Heyns Rearrangements: Landmarks in the History of Carbohydrate Chemistry or Unrecognized Synthetic Opportunities?, *Topics in Current Chemistry*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 215, 115-152.

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

Yaylayan V. 1997. Classification of the Maillard reaction: A conceptual approach, *Trends in Food Science & Technology*, 8, 13-18.

Edité par :

Dominique Job, CNRS, Membre de l'Académie d'agriculture de France.

Nadine Vivier, Université du Maine, Membre de l'Académie d'agriculture de France.

Rapporteurs :

Pr Arnaud Haudrechy, Université de Reims-Champagne Ardenne, France.

Jean-Claude Pernollet, Directeur de recherche honoraire de l'Inra, Membre de l'Académie d'agriculture de France

Claude Debru, Membre de l'Académie d'agriculture de France

Dominique Job, CNRS, Membre de l'Académie d'agriculture de France.

Rubrique :

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

Reçu :

15 avril 2015

Accepté :

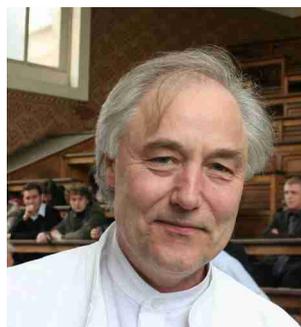
19 mai 2016

Publié :

20 mai 2016

Citation :

This H. 2016. “Maillard products” and “Maillard reactions” are much discussed in food science and technology, but do such products and reactions deserve their name?, *Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture*, 3, 1-10. <https://doi.org/10.58630/pubac.not.129775>.



Hervé This est physico-chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, à AgroParisTech. Il est 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