

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France



Volume 18 (2024)



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, Mylène Durand-Tardif, Hervé This, Nadine Vivier

Comité éditorial : Sylvie Alexandre, Bernard Ambolet, Pere Arús, Barbara Bour-Desprez, Ary Bruand, Yves Brunet, Roisin Burke, Philippe Chemineau, Yves Combarous, Noëlle Dorion, Mylène Durand-Tardif, Christian Ferault, Georges Henri Florentin, André Fougeroux, André-Jean Guérin, Malcolm Hadley, Maria Halamska, Bruno Hérault, François Kepes, Gilles Lemaire, Pascal Marty, Nicole Mathieu, Marie-Claude Maurel, Alain Pavé, Jean-Luc Peyron, Monique Poulot-Moreau, Michel Rieu, Douglas N. Rutledge, Philippe Schmidely, Jean-Marie Seronie, Paulo Jose do Amaral Sobral, Patrick Svensson, Hervé This, Grégoire Thomas, Sophie Villers, Charles Vincent, 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, Mylène Durand-Tardif, Hervé This, Nadine Vivier

Editorial Committee: Sylvie Alexandre, Bernard Ambolet, Pere Arús, Barbara Bour-Desprez, Ary Bruand, Yves Brunet, Roisin Burke, Philippe Chemineau, Yves Combarous, Noëlle Dorion, Mylène Durand-Tardif, Christian Ferault, Georges Henri Florentin, André Fougeroux, André-Jean Guérin, Malcolm Hadley, Maria Halamska, Bruno Héroult, François Kepes, Gilles Lemaire, Pascal Marty, Nicole Mathieu, Marie-Claude Maurel, Alain Pavé, Jean-Luc Peyron, Monique Poulot-Moreau, Michel Rieu, Douglas N. Rutledge, Philippe Schmidely, Jean-Marie Seronie, Paulo Jose do Amaral Sobral, Patrick Svensson, Hervé This, Grégoire Thomas, Sophie Villers, Charles Vincent, 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 18,
Juin-Décembre 2024**

<https://doi.org/10.58630/pubac.not.v540827>

- *Groupe de travail sur les politiques européennes impactant l'agriculture et l'alimentation. 2024. Contribution au dialogue stratégique sur l'avenir de l'agriculture de l'Union européenne / Contribution to the strategic dialogue on the future of agriculture in the European Union, Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF), 18(1), 1,1-7. <https://doi.org/10.58630/pubac.not.a18914>.*
- *Gilles S. 2024. L'aquaculture intégrée multi-trophique (AIMT), Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF), 18(2), 1-11. DOI : 10.58630/pubac.not.a784968.*
- *Gallais A, Lespinasse Y, Devaux P. 2024. Adaptation des cultures au changement climatique : apport possible de l'édition génomique, Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France - Academic Notes of the French Academy of Agriculture (N3AF), 18(3), 1-12. DOI : 10.58630/pubac.not.a880244.*
- *Debru C, La science, de l'erreur à la fraude. Le cas de Lyssenko. Science, from error to fraud. The Lyssenko case. Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF), 18(4), 1-9. DOI: 10.58630/pubac.not.a335599.*

Contribution au dialogue stratégique sur l'avenir de l'agriculture de l'Union européenne

Contribution to the strategic dialogue on the future of agriculture in the European Union

Gilles Bazin, Bernard Bourget, Carmel Cahill (coordinatrice), Jean-Paul Charvet, Tomas Garcia Azarcate, Christian Lippert, Antanas Maziliauskas, Jerzy Plewa, Jean-Marie Séronie, Gérard Viatte, (Section 10 : Économie et politique)

Antoine Messean, Jean-René Trameau (Section 1 : Productions végétales)

Robert Flies, Andreas Kleinschmit von Langefeld, (Section 2 : Forêts et filière bois)

André Pflimlin, (Section 3 : Élevage)

Vincent Chatellier, Marie-Claude Maurel (Section 4 : Sciences humaines et sociales)

Agnes Ricroch, (Section 6 : Sciences de la vie)

Imre Kovách, François Papy, Sebastien Treyer (Section 7 : Environnement et territoires)

Hugo de Vries (Section 8 : Alimentation humaine)

Constant Lecoeur (Section 9 : Agrofournitures)

Résumé

À la suite des manifestations généralisées des agriculteurs à travers l'Europe au début de l'année 2024, la Commission européenne a lancé un dialogue stratégique sur l'avenir de l'agriculture de l'Union européenne. La présente note, élaborée par le Groupe de travail sur les politiques euro-

péennes impactant l'agriculture et l'alimentation, au sein de l'Académie d'agriculture de France, est une contribution à ce dialogue stratégique. Il indique les grandes lignes d'une nouvelle approche, mettant davantage l'accent sur les questions environnementales et climatiques, la

gestion des risques et les systèmes d'innovation. Il définit également certaines caractéristiques générales des instruments politiques qui seront nécessaires pour relever les défis.

Abstract

Following widespread farmer protests across Europe in early 2024, the European Commission launched a Strategic Dialogue on the Future of European Agriculture. This note, prepared by the Working Group on European Policies impacting agriculture and food, of the French Academy of Agriculture, is a contribution to the process. It suggests the broad contours of a new approach, with increased focus on environment and climate issues, risk management and innovation systems. It also defines some general characteristics of the type of policy instruments that will be needed to meet the challenges.

Mots-clés

Politique publique, politique européenne, cohérence, ciblage, simplification

Keywords

Public policy, European policy, coherence, targeting, simplification

Introduction

Lors des manifestations qui ont éclaté dans de nombreux États membres de l'Union européenne (UE), ces derniers mois, de nombreux agriculteurs ont émis une longue liste de griefs, très divers et parfois contradictoires (Chapuis, 2024 ; Hancock et Bounds, 2024). Des gouvernements nationaux et les institutions européennes se sont efforcés de comprendre les problèmes et d'engager des discussions, en vue de proposer des améliorations à court terme (Euractiv, 2024 ; Commission européenne, 2024 ; ministère de l'Agriculture et de la souveraineté alimentaire, 2024). En réponse à ces événements, une réflexion sur le rôle de l'agriculture et du système agroalimentaire dans

nos sociétés, ainsi que la manière dont les politiques publiques devraient être déployées pour l'accomplir, a été déclenchée.

Le système agroalimentaire est soumis à un large éventail de demandes et d'attentes sociales, économiques, territoriales et écologiques, comme en témoignent les objectifs ambitieux fixés par la Politique agricole commune (PAC) pour la période de programmation 2023-2027, le *Green Deal* et son volet « De la ferme à la table », la directive cadre sur l'eau, la stratégie en faveur de la biodiversité, la stratégie européenne de la bioéconomie, ou, encore, l'initiative *One Health* (Commission européenne, 2019 ; 2020 ; 2021 ; 2022 ; 2023 ; Conseil européen, 2024). La Commission européenne a aussi l'intention d'élaborer un cadre législatif complet pour des systèmes alimentaires durables, bien que l'élaboration de ce cadre ait été temporairement suspendue. En outre, le système agroalimentaire est un élément important dans la vision européenne de l'autonomie stratégique et des initiatives en matière d'innovation et d'investissement qui lui sont associées.

Pour éviter l'inefficacité et le gaspillage de ressources publiques limitées, il faut tenter de définir des objectifs cohérents et des moyens d'atteindre ces derniers. Il faut assurer la cohérence tout au long du processus, à partir du stade de la définition des objectifs et de la mise au point d'instruments de mesure pour les atteindre. Il faut identifier les freins technologiques, institutionnels et organisationnels aux transformations nécessaires, et les lever. Les institutions de l'Union européenne et des gouvernements nationaux doivent être renforcées, ainsi que leur capacité de coordination et de communication, entre elles et avec toutes les parties prenantes du système, telles que agriculteurs, industries agroalimentaires, grande distribution, consommateurs et écologistes. Sans une vision commune qui puisse fonder un accord sur la manière de progresser, en réduisant les sujets de confrontation, il sera difficile de répondre aux défis (Séronie, 2018).

Ces derniers se posent dans un contexte d'aggravation des tensions géopolitiques, des risques climatiques et environnementaux, d'une situation démographique peu favorable au renouvellement générationnel, de contraintes budgétaires strictes à la suite de la pandémie de Covid, de besoins d'investissement, et de l'impératif d'augmenter les dépenses en matière de défense. À long terme, s'ajoute la possibilité que de nouveaux membres rejoignent l'UE.

La présente contribution, préparée par le Groupe de travail de l'Académie d'agriculture de France sur les politiques européennes, plaide pour une refonte stratégique de la PAC en tenant compte de l'évolution des autres politiques impactant l'agriculture et le système agroalimentaire. Il conviendra de veiller à ce que les évolutions des politiques soient cohérentes et qu'elles convergent pour atteindre les objectifs identifiés, en cherchant à relever directement les défis et à promouvoir la résilience, la durabilité et l'équité au sein de l'agriculture européenne.

Principes de base pour une meilleure approche de l'élaboration et de mise en œuvre des politiques

Avant d'aborder des domaines politiques spécifiques, quelques principes généraux sont proposés, qui, s'ils étaient suivis, augmenteraient l'efficacité et l'efficience de l'ensemble des politiques.

- Clarifier les différents objectifs, afin de s'assurer de leur cohérence et de mieux cibler les mesures, tout en tenant compte des coûts de transactions pour les agriculteurs et les administrations.
- Renforcer la décentralisation de la mise en œuvre des politiques pour permettre des solutions mieux adaptées aux conditions climatiques, environnementales et socio-économiques locales, sans que cela conduise au plus petit dénominateur commun ou à une distorsion de la concurrence entre États membres de l'UE.
- Établir des cadres politiques clairs visant des objectifs à long terme pour assurer la stabilité et la prévisibilité de l'action publique, et réduire la

fréquence des changements perturbateurs, tout en gardant l'adaptabilité nécessaire dans un environnement en constante évolution.

- Élaborer des voies claires pour des changements de politique majeurs, y compris s'agissant de mesures compensatoires temporaires pour soutenir les transitions, en aidant les agriculteurs qui sont affectés de manière négative.

Mieux cibler le soutien au revenu des agriculteurs pour pouvoir financer d'autres objectifs prioritaires

À moyen terme, il faudrait repenser l'aide au revenu par le biais de paiements directs à l'hectare pour permettre de cibler l'aide là où le besoin s'en fait sentir et pour éviter une distribution fortement déséquilibrée au profit des plus grandes exploitations (Commission européenne, 2022). Plusieurs mécanismes sont possibles, parmi lesquels l'adoption de plafonds contraignants et obligatoires à l'échelle de l'UE, et la dégressivité des paiements, avec la possibilité de prendre en compte le nombre d'unités de travail de l'exploitation.

En fin de compte, les bénéficiaires visés au titre du soutien au revenu doivent être clairement identifiés, en tenant compte de l'ensemble des activités et des sources de revenus des ménages agricoles (Insee, 2021). Ces changements supposent que la part du financement de la PAC attribuée au soutien au revenu de base (avec ou sans conditionnalité) puisse diminuer, libérant ainsi des fonds pour financer d'autres objectifs jugés prioritaires, notamment l'environnement et le climat, la gestion des risques et les systèmes de connaissances et d'innovations agricoles (*Agricultural Knowledge and Innovation Systems*, ou AKIS)

Environnement et climat

Selon plusieurs analyses, les dispositifs environnementaux et climatiques dans la

programmation actuelle de la PAC seraient insuffisants pour répondre à l'ambition déclarée de la PAC 2023-27, et du Pacte vert et son volet « De la ferme à la table », (Baldock, Bradley, 2023 ; Détang-Dessendre, Guyomard, 2023 ; OECD 2023). Des efforts supplémentaires sont nécessaires pour réduire les impacts négatifs du secteur agricole sur l'environnement, le climat et la biodiversité, et pour favoriser les impacts positifs, au moyen de mesures politiques ciblées et fondées sur les résultats, et au moyen de paiements fixés au niveau indispensable pour atteindre les objectifs définis, c'est-à-dire des paiements réellement incitatifs. Les programmes doivent être prévisibles à moyen et long termes, fondés sur une adhésion volontaire, et davantage ouverts à des acteurs au-delà du secteur agricole. Les conditions agronomiques, climatiques et structurelles variant de manière importante à travers l'UE, une relative flexibilité dans la conception et la mise en œuvre des politiques est nécessaire.

Gestion des risques

Le secteur agricole est confronté à des risques économiques, tels que la volatilité des marchés, y compris le marché des intrants, et aux menaces du dérèglement climatique, avec les risques accrus de phénomènes météorologiques extrêmes. Pour aider les agriculteurs à faire face aux difficultés, un cadre complet, avec plusieurs niveaux de gestion des risques, est nécessaire, comprenant des stratégies à l'échelle individuelle (telle que la diversification), des instruments de marché, des mécanismes public-privé et une gestion de crise financée par des fonds publics (Cordier *et al.*, 2008). Les programmes publics ne devraient pas écarter les efforts privés (pour ne pas gaspiller les ressources publiques), ni masquer les signaux nécessaires à l'adaptation au changement climatique. Ils devraient cibler le niveau de revenu ou de la marge de l'exploitation, et non les volumes de production ou les prix individuels (OECD, 2010). Les efforts de formation et de communication doivent être intensifiés, afin

que les agriculteurs en mesurent l'importance et puissent imaginer et mettre en œuvre des stratégies de gestion des risques adaptées à la situation spécifique de leur exploitation.

Connaissances agricoles et systèmes d'innovation

Pour accompagner les agriculteurs dans leur transition vers des systèmes plus durables, s'impose une intensification des efforts consacrés à la recherche, au conseil, à la formation, à la vulgarisation et à la communication. L'ensemble du système AKIS, fondé sur la coordination de plusieurs sources de financement, des fonds européens (dont la PAC), des fonds nationaux et des services du secteur privé, doit fonctionner de manière cohérente pour conduire le système agroalimentaire à relever l'ensemble des défis environnementaux (en lien avec l'eau, la biodiversité et l'adaptation au dérèglement du climat), tout en assurant la rentabilité et la compétitivité de l'activité agricole. La participation de l'ensemble des acteurs pertinents, y compris la société civile, à la définition des stratégies de recherche et d'innovation est nécessaire dès le début du processus, pour s'assurer d'un développement d'innovations scientifiques et technologiques répondant aux objectifs définis (OECD, 2012).

Simplification

La question de la charge administrative et des coûts associés a été portée au premier plan des réclamations des agriculteurs, ainsi que la frustration suscitée par un système de contrôles perçu comme excessif, voire punitif. Tant que ce problème ne sera pas réglé, il sera très difficile de restaurer la confiance et d'obtenir l'engagement recherché de la part des acteurs du secteur agricole. Une bonne conception de politiques davantage axées sur les incitations et les résultats, à orientation volontaire et

Point de vue

collaborative, pourrait atténuer le ressentiment, réduire la complexité et alléger les mécanismes de contrôle. Il existe également un potentiel important de déploiement de nouvelles technologies. Sans plus attendre, chaque niveau de l'administration – européen, national, régional et local – devrait examiner ce qui peut être fait concrètement pour trouver rapidement une nécessaire simplification, tout en s'assurant de l'efficacité des politiques mises en œuvre.

Rééquilibrer le pouvoir de marché dans la chaîne alimentaire

Les agriculteurs sont souvent confrontés à des acteurs très concentrés et puissants dans la chaîne alimentaire. Un meilleur équilibre est essentiel pour leur permettre de capter une part plus importante de la valeur ajoutée et de renforcer la rentabilité. Pour y parvenir, un soutien accru aux organisations de producteurs et interprofessionnelles sera nécessaire, y compris pour qu'elles intègrent des objectifs économiques, environnementaux et sociaux. L'exception à l'application des règles de concurrence à l'agriculture, prévue par les traités, notamment le Traité sur le fonctionnement de l'Union européenne (Toute l'Europe, 2012), est importante dans ce contexte, et devrait être maintenue, tout en veillant à ce que la concurrence contribue au dynamisme du secteur et de l'économie.

La politique commerciale

La politique commerciale de l'UE vise à procurer des bénéfices à l'économie des pays européens, y compris au secteur agroalimentaire, mais son développement implique la recherche de compromis susceptibles de faire des perdants et des gagnants. À l'avenir, des efforts de communication devront être consentis afin de garantir que les avantages et les inconvénients des accords proposés soient explicités et mieux compris (Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique,

2024). Les consommateurs doivent être rassurés sur le fait que les accords commerciaux ne peuvent menacer la santé végétale, animale ou humaine, et, dans ce contexte, que les accords sur les mesures sanitaires et phytosanitaires (SPS) et sur les obstacles techniques au commerce (OTC) de l'Organisation mondiale du commerce (l'OMC) soient pleinement respectés, par un renforcement des contrôles aux frontières si nécessaire (Sénat, 2022).

Les accords préférentiels de commerce peuvent aller plus loin que les règles multilatérales, et cette possibilité devrait être exploitée dans toute la mesure du possible. Les dispositions de réciprocité (« clauses miroirs ») sur des questions telles que l'environnement, le climat, le bien-être animal, ainsi que le respect des droits de l'Homme, doivent jouer un rôle, même si cela pose de considérables difficultés d'ordre politiques et techniques. Des progrès dans ce domaine seront essentiels pour susciter le soutien des parties prenantes à la transformation du système agroalimentaire et pour éviter de verser dans un protectionnisme néfaste.

Domaines relevant de la compétence des gouvernements nationaux

Un grand nombre de domaines politiques relèvent de la compétence des gouvernements nationaux, parmi lesquels le foncier, la fiscalité, les relations entre les différents acteurs de la chaîne alimentaire et d'autres réglementations affectant le système agroalimentaire. Parallèlement aux discussions menées au niveau européen, les cadres réglementaires nationaux devraient être réexaminés en vue d'identifier et d'éliminer les obstacles à l'innovation et à la compétitivité, de manière à garantir la cohérence des politiques et à soutenir les efforts de simplification.

Remarques finales

Le Groupe de travail de l'Académie d'agriculture

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

de France reconnaît que les défis auxquels sont confrontés le système agroalimentaire et tous ceux qui y travaillent sont considérables. Dans cette première contribution, nous nous sommes limités à définir quelques principes et orientations généraux. Nous sommes prêts à continuer de contribuer au processus en approfondissant ces réflexions et en élaborant des propositions spécifiques d'instruments et de leur mise en œuvre, dans des domaines que nous considérons prioritaires. Ce faisant, nous serons particulièrement attentifs à la nécessité de cohérence et de convergence en allant bien au-delà du secteur agricole pour inclure, parmi d'autres, l'ensemble du système agroalimentaire, l'environnement, le climat, la santé, l'innovation, la concurrence, et le commerce.

Références

- Baldock D, Bradley H. 2023. Transforming EU land use and the CAP: a post-2024 vision, Policy Paper, Institute for European Environmental Policy.
- Chapuis D, 2024. Les multiples raisons de la colère des agriculteurs, Les Échos. <https://www.lesechos.fr/politique-societe/politique/es-multiples-raisons-de-la-colere-des-agriculteurs-2047610>
- Commission européenne, 2019. De la ferme à la table : Le pacte vert pour l'Europe. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/860609/Farm_to_fork_fr.pdf.pdf
- Commission européenne, 2020. Stratégie de l'UE en faveur de la biodiversité à l'horizon 2030. <https://eur-lex.europa.eu/FR/legal-content/summary/eu-biodiversity-strategy-for-2030.html>
- Commission européenne, 2021. La bonne qualité de l'eau en Europe (directive-cadre sur l'eau). <https://eur-lex.europa.eu/FR/legal-content/summary/good-quality-water-in-europe-eu-water-directive.html>
- Commission européenne, 2022a. Bioeconomy strategy. https://knowledge4policy.ec.europa.eu/bioeconomy/bioeconomy-strategy_en
- Commission européenne, 2022b. Direct payments to agricultural producers. Graphs and figures. https://agriculture.ec.europa.eu/system/files/2023-03/direct-aid-report-2021_en.pdf
- Commission européenne, 2023a. La politique agricole commune : 2023-2027. https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/cap-overview/cap-2023-27_fr
- Commission européenne, 2023b. Overview: What is the One Health approach? https://health.ec.europa.eu/one-health/overview_en?prefLang=fr
- Conseil européen, 2024. Soutien aux agriculteurs : le Conseil approuve un réexamen ciblé de la politique agricole commune. <https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2024/03/26/support-for-farmers-council-endorses-targeted-review-of-the-common-agricultural-policy/>
- Cordier J, Erhel A, Pindard A, Courleux F. 2008. La gestion des risques en agriculture de la théorie à la mise en œuvre : éléments de réflexion pour l'action publique. Notes et Études Économiques, Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du territoire, 33-71.
- Détang-Dessendre C, Guyomard H (eds). 2023. *Evolving the Common Agricultural Policy for Tomorrow's Challenges*, Editions Quæ, Versailles, 310 p.
- Euractiv. 2024. Manifestations des agriculteurs en Europe: Où ont-ils été écoutés (ou pas) ? <https://www.euractiv.fr/section/agriculture-alimentation/news/manifestations-des-agriculteurs-en-europe-ou-ont-ils-ete-ecoutes-ou->

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

[pas/?_ga=2.64902892.27182408.1718985435-78398154.1718985435](https://doi.org/10.58630/pubac.not.a18914)

Hancock A, Bounds A. 2024. The power of Europe's rebellious farmers, *The Financial Times*. <https://www.ft.com/content/c642343b-589e-4347-9a7f-ff04b83728ff>

Insee. 2021. No 1876. Le niveau de vie des ménages agricoles est plus faible dans les territoires d'élevage. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5434584>

Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2024. <https://agriculture.gouv.fr/simplification-marc-fesneau-presente-44-mesures-et-chantiers-de-simplification>

Ministère de l'Economie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique, Direction générale du Trésor, 2024. Suivi de la mise en place de l'AECG/CETA, Canada.

OECD. 2023. Policies for the future of farming and food in the European Union. OECD Agriculture and food policy reviews. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/32810cf6-en>.

OECD. 2012. Improving Agricultural Knowledge and Innovation Systems: OECD Conference Proceedings, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264167445-en>.

OECD. 2010. Gestion des risques dans l'agriculture: Une approche holistique, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264075337-fr>.

Sénat. 2022. Rapport d'information fait au nom de la Commission des affaires économiques sur la compétitivité de la ferme France, par Duplomb L, Louault P, Mérillou sénateurs, Recommandations N° 22 et 23.

Séronie J-M. 2018. *Pac et mondialisation, une politique européenne encore commune*, Éditions

Quae, 176p.

Toute l'Europe. 2012. Traité sur le fonctionnement de l'Union européenne, <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:12012E/TXT:fr:PDF>.

Rubrique

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

Éditeur :

Anonyme

Rapporteurs :

1. Anonyme
2. Anonyme

Reçu

12 juin 2024

Accepté

30 juin 2024

Publié

14 juillet 2024

Citation

Groupe de travail sur les politiques européennes impactant l'agriculture et l'alimentation. 2024. Contribution au dialogue stratégique sur l'avenir de l'agriculture de l'Union européenne / Contribution to the strategic dialogue on the future of agriculture in the European Union, *Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF)*, 18(1), 1,1-7. <https://doi.org/10.58630/pubac.not.a18914>.

L'aquaculture intégrée multi-trophique (AIMT) Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA)

Sylvain Gilles

Bureau d'études Expertises Aquacoles Tropicales, EAT, 214 rue de Sicile, 34080, Montpellier

Correspondance :
sylvain.gilles@ird.fr

Résumé

L'aquaculture intégrée multi-trophique, ou AIMT, est l'objet d'un intérêt croissant aussi bien de la part des producteurs que des chercheurs. Elle est dite circulaire en référence à l'économie ainsi nommée, qui consiste à recycler les déchets liés à son activité. Ce concept implique une variété de systèmes d'élevage dont nous faisons l'inventaire. Nous verrons que la complémentarité bactéries/algues y est fondamentale selon le rôle plus ou moins important joué par la photosynthèse. Cette aquaculture est pratiquée aussi bien en eau douce que marine ou saumâtre.

Abstract

Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) is a subject of growing interest in the world of aquaculture, in terms of both research and production. The term "circular" refers to the economy of recycling waste. This concept implies a variety of farming systems, which we will now take stock of. We'll see that the bacteria/algae complementarity is fundamental, depending on

the more or less important role played by photosynthesis. This kind of aquaculture is practiced in fresh, marine or brackish water.

Mots clés

aquaculture, déchets, bactéries, algues.

Keywords

aquaculture, waste, bacteria, algae

Définition, fonctionnement

L'aquaculture intégrée multi-trophique (AIMT) combine, au sein d'un même système de production, différentes espèces complémentaires, végétales et animales, appartenant chacune à un maillon d'une chaîne alimentaire, ou trophique (Troell, 2009 ; Granada *et al.*, 2015 ; Neori *et al.*, 2017). Les poissons et les crevettes retiennent seulement 20 à 30 %

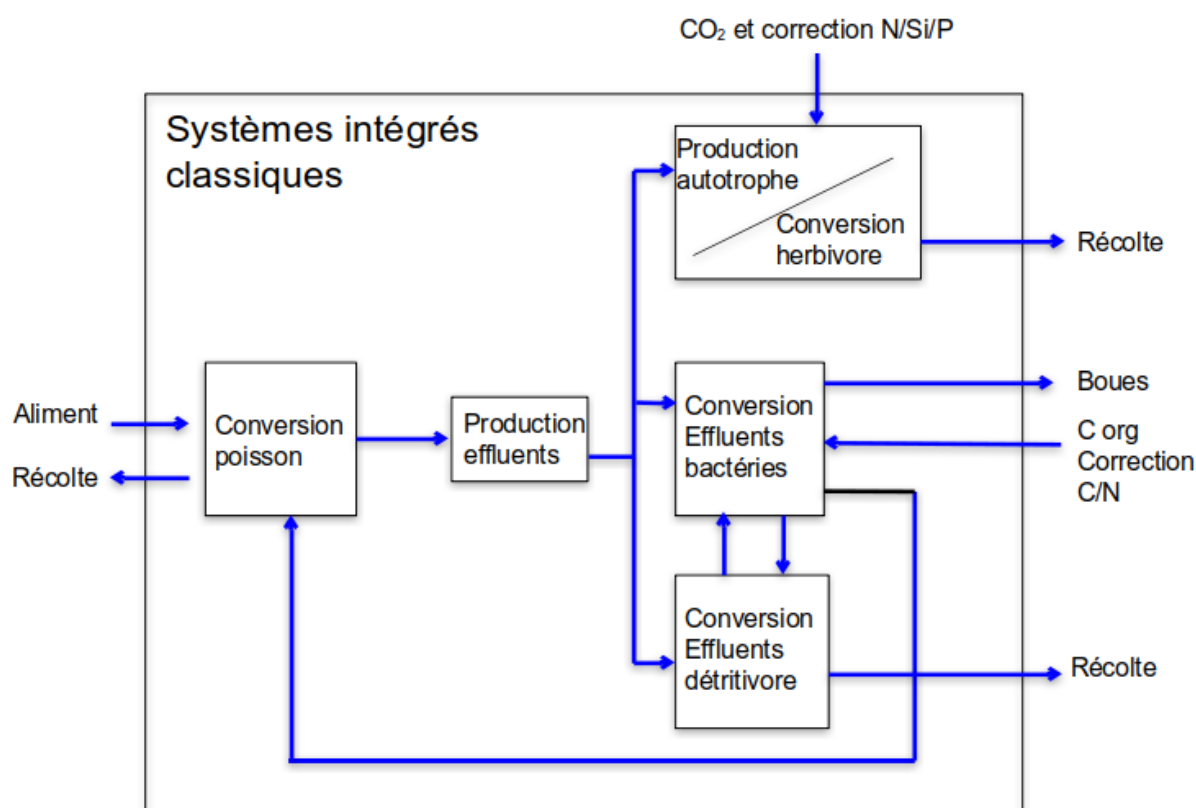


Figure 1. Concept du système intégré illustrant les flux de macronutriments (N et P), et identifiant les cinq modules possibles d'une aquaculture intensive intégrée (projet ZAFIRA, Schneider et al., 2005).

des nutriments contenus dans l'aliment qu'ils reçoivent (Avnimelech et Ritvo, 2003). Ainsi les effluents produits par leur excrétion, sous forme de dérivés azotés (urines), toxiques pour les animaux élevés, et phosphorés, servent de nutriments à des bactéries et des végétaux macroscopiques ou microscopiques qui sont ensuite ingérées par des consommateurs primaires (zooplancton, mollusques), inclus dans l'écosystème artificiel mis en place. Ces derniers font l'objet d'une sous-production ou sont consommés par des consommateurs secondaires (crustacés, poissons). Ainsi l'AIMT épure le milieu des effluents d'élevage toxiques tout en contribuant à apporter un complément alimentaire, notamment protéique, aux animaux élevés.

L'AIMT a été initialement conceptualisée en milieu

ouvert autour de cages flottantes piscicoles à partir des effluents qui en sortent à travers les mailles des poches en filet (Chopin *et al.*, 2001). L'inconvénient de cette approche réside dans la difficulté à éviter la dispersion, dans le milieu naturel, des effluents qui ne sont pas intégralement utilisés par les producteurs primaires ciblés. Puis elle a été appliquée en milieu fermé, en bassins avec recyclage de l'eau (Neori *et al.*, 2004, 2017 ; Roel et Veerdegem, 2011 ; Wilfart *et al.*, 2020) ou en circuits fermés hors sol (Metaxa *et al.*, 2006 ; Muangkeow *et al.*, 2011). De cette façon, il est possible de maîtriser l'utilisation des effluents d'élevage dans chaque maillon de la chaîne trophique (Figure 1), en rapport avec le degré de recyclage de l'eau et des sédiments. Les risques de développement d'organismes pathogènes diminuent en raison

Note de synthèse

Tableau 1. La croissance des algues augmente inversement à leur taille, car elle est liée au rapport entre la surface de leur membrane utile aux échanges avec le milieu extérieur et le volume de leur milieu intérieur. L'absorption des nutriments et du carbone inorganique (CO_2) s'en trouve facilitée. Les algues planctoniques sont d'autant plus efficaces qu'elles occupent la totalité du volume d'eau (Hargreaves, 2006).

Morphologie	Dimensions	Surface/Volume	Exemple	Croissance (% par jour)
Petite sphère planctonique	10 μm	150 000	<i>Tretraselmis suecia</i>	51
Feuille mince	2 cm x 5 cm x 80 μm	25 000	<i>Porphyra spp</i> <i>Ulva spp</i>	25
Feuille charnue	2 cm x 5 cm x 500 μm	4 100	<i>Gracilaria</i>	10

de l'isolement de l'élevage et de la concurrence entre micro-organismes au sein de l'écosystème artificiel qui contribue à un apport de pro-biotiques (Verschuere, 2000). La productivité de l'AIMT est équivalente à celle de l'aquaculture classique lorsque l'espèce ciblée alimentée, dite de nourrissage, est carnivore ou omnivore (Gilles *et al.* 2014). En revanche le recyclage de l'azote et du phosphore permet des économies en apports protéiques importantes quant à l'alimentation exogène et une production secondaire d'animaux filtreurs ou détritvires. Un cortège de bactéries et de végétaux prend en charge les effluents solides (fèces, aliment exogène non consommé) et solubles (urine) pour les intégrer à l'écosystème. La dégradation de la matière organique doit être réalisée en aérobie afin d'éviter les pertes en azote sous forme gazeuse ; pour cela l'action complémentaire d'animaux détritvires et bioturbateurs (Ritvo *et al.*, 2004), fousseurs du sédiment, est une plus-value (Avnimelech *et al.*, 1999). Selon l'importance accordée à la photosynthèse, au sein des systèmes d'élevage, l'action des bactéries vis-à-vis de celle des végétaux est variable. La capacité qu'ont les algues d'incorporer le carbone inorganique (CO_2) issu de la respiration, dissous dans l'eau (formes H_2CO_3 , HCO_3^- et CO_3^{2-}), et les nitrates, contrairement aux bactéries, constitue un avantage. Cette capacité dépend de leur taille et

leur morphologie qui influe directement sur leur croissance (Tableau 1).

L'aquaponie

L'aquaponie combine un élevage de poissons dans un circuit fermé en eau claire et douce, et une production de légumes destinés essentiellement à la consommation humaine, en structures hors-sol selon la technique de l'hydroponie (Ibrahim *et al.*, 2023). Le principe est d'utiliser l'eau, chargée en effluents, issue des bacs d'élevage, pour irriguer les plantes cultivées et leur apporter les nutriments nécessaires à la croissance. Des bactéries aérobies (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*) implantées sur un filtre biologique transforment l'urine des poissons, sous forme d'ammoniaque, en nitrates directement assimilables par la végétation. Ces bactéries sont dites chimio-autotrophes, car elles assimilent des éléments minéraux azotés pour leur croissance.

En revanche, la valorisation des effluents solides, constitués de matière organique, en sortie d'un filtre mécanique est plus délicate. Pour être « utiles », ils doivent faire l'objet d'une dégradation bactérienne hétérotrophe aérobie (ammonification) qui nécessite un surplus d'énergie indispensable à l'oxygénation du milieu par aération. Un apport complémentaire

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

Tableau 1. Avantages et inconvénients de la TBF comparée aux bassins semi-intensifs classiques et aux circuits fermés au sens large (Hargreaves, 2013).

	Bassins	Circuits fermés
Avantages		
Amélioration de la sécurité de l'élevage	✓	
Amélioration de la conversion de l'aliment	✓	✓
Amélioration de l'utilisation de l'eau	✓	
Augmentation de l'efficacité de l'occupation de l'espace	✓	
Amélioration du contrôle de la qualité de l'eau	✓	
Réduction la sensibilité aux fluctuations de la lumière solaire	✓	
Inconvénients		
Augmente les besoins en énergie pour l'aération et le brassage	✓	✓
Réduit le temps d'intervention en raison du taux de respiration élevé du milieu	✓	✓
Période de démarrage requise	✓	
Augmente l'instabilité de la nitrification		✓
Nécessité de maintenir une alcalinité élevée	✓	
Augmente les risques de pollution liée à l'accumulation des nitrates	✓	
Variations saisonnières de l'efficacité des systèmes dépendant de la lumière solaire		✓

en oligo-éléments (N, Si) dans l'eau d'irrigation (Figure 1) est nécessaire. L'eau non consommée par les plantes, épurée des nitrates, retourne dans le volume d'élevage.

La technologie bio-floc

La technologie bio-floc (TBF) connaît un fort engouement depuis deux décennies (Avnimelech, 2007 ; Castro-Nieto *et al.*, 2012 ; Emerenciano *et al.*, 2013 ; 2015 ; 2017 ; Cardona, 2015 ; Mugwanya *et al.*, 2021 ; Nisar *et al.*, 2022). Elle est destinée à élever dans un volume unique des animaux filtreurs, à l'origine, des crevettes pénéides en eau de mer (Blancheton *et al.*, 1987 ; Hopkins *et al.*, 1993 ; Browdy *et al.*, 2014 ; Nisar *et al.*, 2022), puis des tilapias en eau douce ou saumâtre (Avnimelech, 2007 ; Ogello *et al.*, 2014 ; Caipang et Avillanosa, 2019), enfin des carpes, des silures (Becerril-Cortés *et al.*, 2017) et des anguilles (Vinatea *et al.*, 2023). Dans ce volume

sont remis en suspension les effluents solides (fèces) et l'aliment non consommé sous forme de floculats à l'aide d'un fort bullage provenant d'une soufflante d'air à basse pression (Avnimelech *et al.*, 1994). Un des avantages est la faible consommation d'eau, seules les pertes liées à l'évacuation des excédents de matière organique sédimentée (boues) et à l'évaporation sont compensées (Burford *et al.*, 2003). Les floculats, composés de matière organique associée à des bactéries, des micro-algues et du zooplancton, permettent une économie en protéines dans l'aliment exogène de l'ordre de 50 % avec un taux d'alimentation moyen de 2 % par jour (Avnimelech, 2007). La matière organique mise en suspension est consommée par des bactéries hétérotrophes en aérobiose (Jamal *et al.*, 2020 ; Wasave *et al.*, 2020 ; Padeniya *et al.*, 2022). Ces dernières utilisent l'oxydation du carbone organique en CO₂ comme source d'énergie et excrètent de l'azote

Note de synthèse

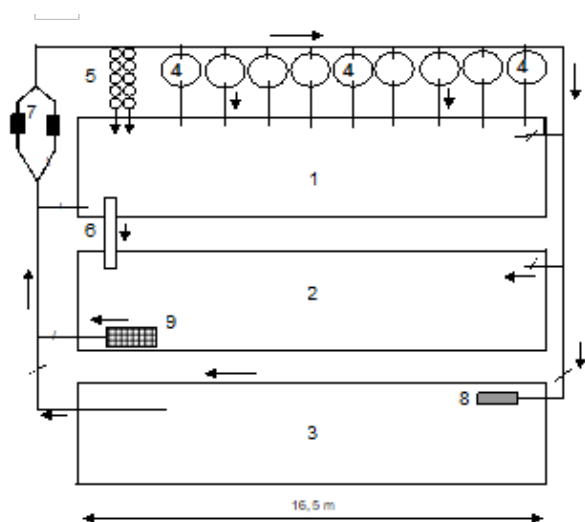


Figure 2. Schéma et photographie du prototype installé sur le centre IRD de Mbour au Sénégal : 1 et 2 bassins de lagunage, 3 bassin dédié à croissance du zooplancton, 4 bacs de grossissement, 5 bacs d'alevinage, 6 écoulement entre les bassins 1 et 2, 7 pompes fonctionnant en alternance, 8 et 9 filtres (© N. De Wilde).

sous forme ammoniacale (ammonification). Elles assimilent ensuite cet azote ammoniacal, ainsi que celui produit par l'ensemble des organismes hétérotrophes (poissons, zooplancton), et, ainsi faisant, synthétisent des protéines qui sont consommées par les crevettes ou les poissons (Crab *et al.*, 2007 ; 2012). Toutefois elles n'ont pas la capacité d'incorporer le CO_2 , comme les algues, via la photosynthèse. Pour effectuer cette synthèse protéique, elles ont besoin d'un apport complémentaire de carbone organique (Figure 1) sous forme de mélasse ou d'amidon de blé selon un ratio C/N élevé, de l'ordre de 15 (Avnimelech *et al.*, 1994 ; Avnimelech et Kochba, 2009).

L'azote ammoniacal issu de la respiration globale est transformé en NO_2 (nitritation), puis en NO_3 (nitratation) par des bactéries chimio-autotrophes, *Nitrosomonas sp.* et *Nitrobacter sp.* Ces dernières produisent en bout de chaîne des nitrates qui ne sont pas valorisés par la communauté bactérienne, mais uniquement par les algues via la photosynthèse. Deux grands types de bio-flocs sont représentatifs – mixotrophe et hétérotrophe – selon la quantité de phytoplancton présente dans les floculats (Cardona, 2015). La quantité de boues (sédiments) et de nitrates à évacuer du système est nettement plus importante lorsque le milieu est uniquement hétérotrophe et chimio-autotrophe. Cela est compréhensible, car les floculats, contrairement aux algues, ne sont pas enveloppés par une membrane et ainsi se désagrègent en partie en particules trop fines pour être absorbées par les animaux en élevage. Ainsi, avec la TBF, l'élimination de ces boues non consommées implique l'absence de recyclage intégral des éléments organiques et minéraux. Le zooplancton présent dans les floculats est principalement composé de copépodes, de rotifères, de ciliés, de protozoaires flagellés et de nématodes (Azim et Little, 2008 ; Ballester *et al.*, 2010 ; Cardona, 2015) ; il constitue un complément alimentaire dont la composition et la quantité sont variables selon la qualité du milieu (salinité, luminosité, eutrophisation). Un effet bénéfique de la TBF sur la survie des animaux élevés serait dû à la présence de composants bioactifs, de micro-organismes probiotiques contenus dans les floculats, et d'une compétition interspécifique bactérienne dans le milieu d'élevage, notamment entre les genres *Vibrio* et *Bacillus* (Browdy *et al.*, 2013).

Les circuits fermés planctoniques

L'AIMT en circuit fermé planctonique (Hargreaves, 2006), en eau verte liée à la couleur du phytoplancton, a d'abord été étudiée expérimentalement en Israël (Diab *et al.*, 1992). L'idée était d'associer en boucle, dans un rapport volumétrique 1/6, des bacs d'élevage (10

Note de synthèse

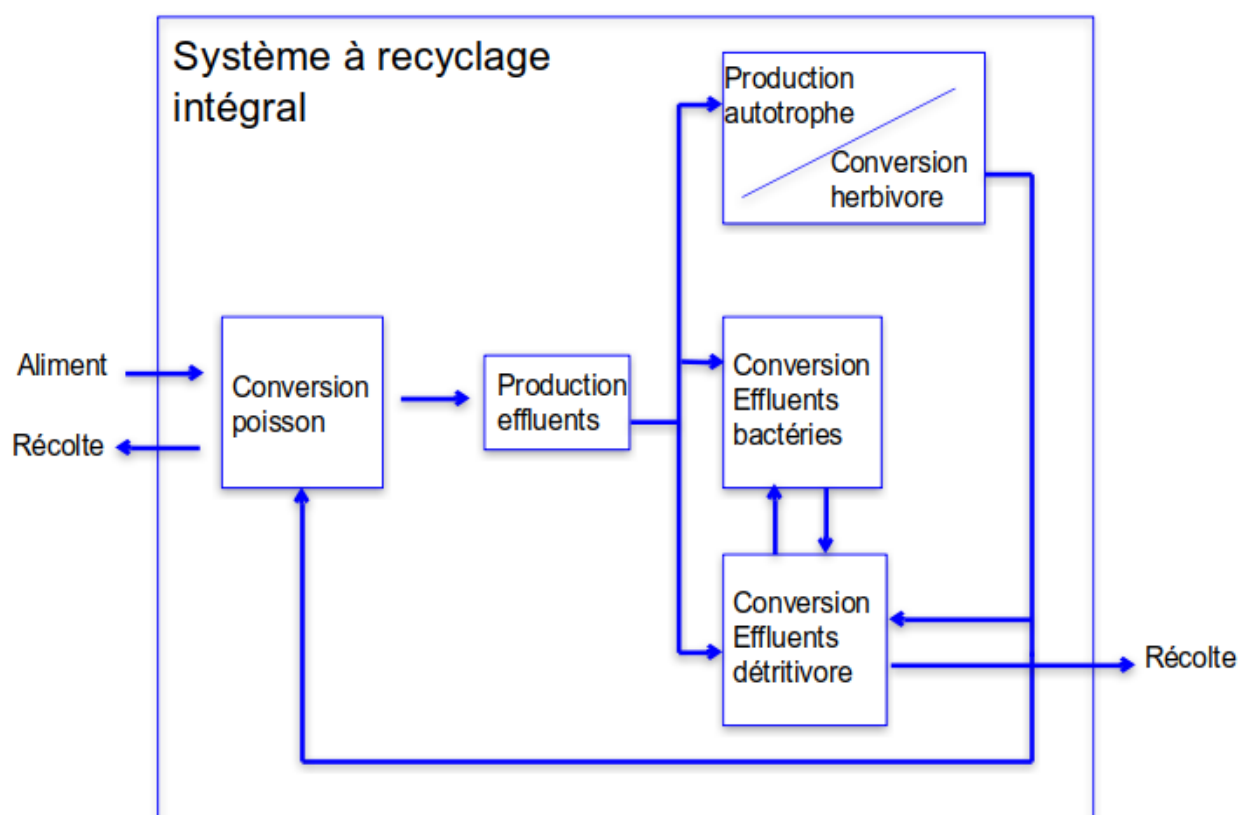


Figure 3. Représentation schématique d'un système à recyclage intégral dérivée de la figure 1. Le recyclage des effluents est réalisé via la photosynthèse, l'activité bactérienne et la détritivorie.

kg/m³) de tilapias (*Oreochromis aureus*) alimentés, à un grand bassin de lagunage en élevage extensif (0,25 kg/m²), où des carpes (*Cyprinus carpio*) se nourrissaient uniquement des effluents solides reçus des premiers. L'eau du bassin de lagunage était recyclée par pompage vers les bassins d'élevage après avoir été épurée par le phytoplancton et les bactéries chimio-autotrophes de l'azote ammoniacal. Cependant le sédiment accumulé dans le lagunage lié surtout aux algues mortes (Hargreaves, 2001 ; 2006) impliquait des pertes en azote sous forme gazeuse (N₂), car sa consommation par les carpes, en trop faible densité, était insuffisante. Il était aussi difficile de quantifier l'abattement de la concentration en algues à effectuer devant l'impossibilité de contrôler le flux d'entrée d'eau dans le lagunage.

Une décennie plus tard, Brune *et al.* (2003) ont mis au point le *partitioned aquaculture system*

(PAS). Ce système d'élevage (Drapcho, 2000), divisé en différents volumes réservés à chaque maillon de la chaîne trophique, diffère du précédent par le fait que le phytoplancton est récolté par filtration. Il est appliqué notamment à un élevage de silures (*Ictalurus punctatus*), mais aussi de crevettes d'eau douce (*Macrobrachium sp.*), dont les effluents solides sont piégés dans un volume (digesteur), où ils sont consommés par des tilapias omnivores ; puis l'eau chargée en nutriments est envoyée dans un chenal de lagunage réservé à la croissance du phytoplancton. La consommation en eau est réduite à 12 % de son usage conventionnel.

Vers un recyclage intégral en circuit fermé « eau verte »

Le prototype d'un circuit fermé destiné au

Note de synthèse

recyclage intégral des éléments organiques et minéraux a été mis en place au Sénégal (Gilles *et al.*, 2008 ; 2013) en eau saumâtre autour de la détritivorie du tilapia lagunaire euryhalin *Sarotherodon melanotheron* (Pauly, 1976) endémique des lagunes d'Afrique de l'Ouest.

Des volumes d'élevage intensif étaient associés à des bassins de lagunage selon un rapport 1/6. Ce tilapia était à la fois placé dans la partie intensive, alimenté, et dans le lagunage, non alimenté. La conversion herbivore, c'est-à-dire la régulation du phytoplancton, était réalisée à l'aide de zooplancton, dans un bassin placé en dérivation du circuit principal (Figure 2), qui fonctionnait en discontinu selon une fréquence de 48 heures avec un remplissage dont l'amplitude était fonction de l'abattement de la concentration en phytoplancton à réaliser dans le circuit principal. L'eau de vidange de ce bassin était renvoyée dans le circuit principal, appauvrie en algues et riche en zooplancton.

Ce dernier était alors consommé par les tilapias. Le système d'élevage a étéensemencé naturellement par la micro-algue *Nannochloris sp.* (35×10^6 cellules/mL) et le rotifère *Brachionus plicatilis*. L'élimination du sédiment a été totale dans le lagunage, et partielle dans le bassin régulateur du phytoplancton. Seule l'évaporation de l'eau était compensée, soit 1,5 % par jour du volume total. La détritivorie a fait l'objet d'une récolte en tilapias complémentaire.

Ce système d'élevage a fonctionné en Amazonie péruvienne en eau douce, avec des espèces endémiques : le silure *Pseudoplatystoma punctifer* en tant que poisson de nourrissage, en ayant recours dans le lagunage à la détritivorie de Loricariidés (Gilles *et al.*, 2014). Le rotifère *Trichocerca sp.*, qui avait colonisé spontanément l'écosystème, était consommé par des Cichlidés endémiques, placés aussi dans le lagunage, afin de maintenir constante la concentration en phytoplancton. Naturellement le milieu a été occupé par *Chlorella sp.* à des densités beaucoup plus faibles qu'au Sénégal en raison du différentiel en sels nutritifs. Au sein du système d'élevage le recyclage des éléments organiques et minéraux fut intégral (Figure 3).

Conclusion

L'AIMT joue un rôle de plus en plus important face au changement global en permettant d'isoler les élevages des pollutions et des intempéries (FAO, 2018). Le recyclage des effluents va dans le sens d'une autonomie pour l'alimentation des élevages et implique des économies d'énergies et financières. Elle ouvre des champs de recherches importants notamment pour la formulation d'aliments de synthèse adaptés au fonctionnement des écosystèmes artificiels, et la quantification des flux entre leurs niveaux trophiques.

Références

- Avnimelech Y, Kochba M, Diab S. 1994. Development of controlled intensive aquaculture systems with a limited water exchange and adjusted carbon to nitrogen ratio, *Bamidgeh*, 46(3), 119-131.
- Avnimelech Y, Kochva, M, Hargreaves JA. 1999. Sedimentation and resuspension in earthen fish ponds, *Journal of the World Aquaculture Society*, 30, 401-409.
- Avnimelech Y, Ritvo G. 2003. Shrimp and fish pond soils: processes and management, *Aquaculture*, 220, 549-567.
- Avnimelech Y. 2007. Feeding with microbial flocs by tilapia in minimal discharge bio-flocs technology ponds, *Aquaculture*, 264(1), 140-147.
- Avnimelech Y. 2009. *Biofloc Technology - A practical guide book*, The World Aquaculture Society, Baton Rouge, Louisiana (USA).
- Avnimelech Y, Kochba M. 2009. Evaluation of nitrogen uptake and excretion by tilapia in bio floc tanks, using ^{15}N tracing, *Aquaculture*, 287(1), 163-168.

Note de synthèse

- Azim ME, Little DC. 2008. The biofloc technology (BFT) in indoor tanks: water quality, biofloc composition, and growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*), *Aquaculture*, 283, 29-35.
- Ballester ELC, Abreu PC, Cavalli RO, Emerenciano M, De Abreu L, Wasielesky JW. 2010. Effect of practical diets with different protein levels on the performance of *Farfantepenaeus paulensis* juveniles nursed in a zero exchange suspended microbial flocs intensive system, *Aquaculture Nutrition*, 16, 163–172.
- Becerril-Cortés D, Monroy-Dosta MC, Coelho-Emerenciano MG, Castro-Mejía G, Cienfuegos-Martinínez K, Lara-Andrade R. 2017. Nutritional importance for aquaculture and ecological function of microorganisms that make up Biofloc, a review, *International Journal of Aquatic Science*, 8(2), 69-77.
- Blancheton JP, Calvas J., Michel AH, Vonau V, 1987. Intensive shrimp breeding process, USA Patent number: 4,640,227.
- Browdy C, Hargreaves J, Hoang T, Avnimelech Y. 2013. *Proceedings of the Biofloc Technology and Shrimp Disease Workshop*. December 9-10, 2013, Ho Chi Minh City, Vietnam, The Aquaculture Engineering Society. Copper Hill, VA USA.
http://www.aesweb.org/shrimp_health.php.
- Brune DE, Schwartz G, Everole AG, Collier JA, Schwedler TE. 2003. Intensification of pond aquaculture and high rate photosynthetic systems, *Aquacultural Engineering*, 28, 65-86.
- Burford MA, Thompson PJ, McIntosh RP, Bauman RH, Pearson DC. 2003. Nutrient and microbial dynamics in high-intensity, zero-exchange shrimp ponds in Belize, *Aquaculture*, 219, 393-411.
- Caipang CMA, Avillanosa AL 2019. Backyard farming of tilapia using a biofloc-based culture system. *The Palawan Scientist*, 11. Western Philippines University.
- Cardona E. 2015. Influence de l'environnement trophique de l'élevage en biofloc sur les performances physiologiques de la crevette *Litopenaeus stylirostris* : Étude de paramètres de la nutrition, de l'immunité et de la reproduction. Thèse de doctorat. École doctorale du Pacifique (ED 469).
- Castro-Nieto LM, Castro-Barrera T, De Lara-Andrade R, Castro-Mejía J, Castro-Mejía, G. 2012. Biofloc systems: a technological breakthrough in aquaculture, *Revista Digital del Departamento El Hombre y su Ambiente*, 1 (1), 1-5.
- Chopin T, Buschmann AH, Halling C, Troell M, Kautshy N, Neori A, Kraemer GP, Zertuche-Gonzalez JA, Yarish C, Neefus C. 2001. Integrating seaweeds into mariculture systems: a key towards sustainability, *Journal of Phycology*, 37, 975-986.
- Crab R, Avnimelech Y, Defoirdt T, Bossier P, Verstraete W. 2007. Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production, *Aquaculture*, 270, 1-14.
- Crab R, Defoirdt T, Bossier P, Verstraete W. 2012. Biofloc technology in aquaculture: Beneficial effects and future challenges, *Aquaculture*, 351-357.
- Diab S, Kochba M, Mires D, Avnimelech Y. 1992. Combined intensive-extensive (CIE) pond system. A: inorganic nitrogen transformation, *Aquaculture*, 101, 33-39.
- Drapcho CM, Brune DE. 2000. The partitioned aquaculture system: impact of design and environmental parameters on algal productivity and photosynthetic oxygen production, *Aquacultural Engineering*, 21, 151-168.

Note de synthèse

- Emerenciano M, Gaxiola G, Cuzon G. 2013. Biofloc Technology (BFT): A Review for Aquaculture Application and Animal Food Industry, *InTech*. DOI : [10.5772/53902](https://doi.org/10.5772/53902).
- Emerenciano M, Lemos de Mello G, Ribeiro F, Miranda-Baeza A, Martinez-Cordova L. 2015. Recent Advances in Aquaculture Systems Based on Microorganisms: The Biofloc Technology (Bft) Case, *Nutrición Acuicola: Investigación y Desarrollo*. Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, ISBN 978-607-27-0593-7, 51-61.
- Emerenciano M, Martinez-Cordova L, Martinez-Porchas M, Miranda-Baeza A. 2017. Biofloc Technology (BFT): A tool for Water Quality Management in Aquaculture, *InTech*, DOI : [10.5772/66416](https://doi.org/10.5772/66416).
- FAO. 2018. *Impacts du changement climatique sur les pêches et l'aquaculture*. Résumé du Document technique sur les pêches et l'aquaculture n°627. Rome. 48 p.
- Gilles S, Lacroix G, Corbin D, Bâ N, Ibañez Luna C, Nandjui J, Ouattara A, Ouedraogo O, Lazzaro X. 2008. Mutualism between euryhaline tilapia *Sarotherodon melanotheron heudelotii* and *Chlorella* sp. – implications for nano-algal production in warm water phytoplankton-based recirculating systems, *Aquacultural Engineering*, 39, 113-121.
- Gilles S, Fargier L, Lazzaro X, Baras E, De Wilde N, Drakidès C, Amiel C, Rispal B, Blancheton JP 2013. An integrated fish-plankton aquaculture system in brackish water. *Animal*, 7, 322-329.
- Gilles S, Ismiño R, Sánchez H, David F, Núñez J, Dugué R, Darias M and Römer U. 2014. An integrated closed system for fish-plankton aquaculture in Amazonian fresh water, *Animal*, 1-10.
- DOI : [10.1017/S1751731114001165](https://doi.org/10.1017/S1751731114001165).
- Granada L, Sousa N, Lopes S and Lemos MFL. 2015. Is integrated multitrophic aquaculture the solution to the sectors' major challenges? A review, *Reviews in Aquaculture*, 6, 1-18.
- Hargreaves JA. 2006. Photosynthetic suspended-growth systems in aquaculture, *Aquacultural Engineering*, 34, 344-363.
- Hargreaves JA. 2013. Biofloc Production Systems for Aquaculture. *SRAC Publication* No. 4503.
- Hopkins JS, Hamilton RD, Sandifer PA, Browdy CL, Stokes AD, 1993. Effect of water exchange rate on production, water quality, effluent characteristics and nitrogen budgets of intensive shrimp ponds, *Journal of the World Aquaculture Society*, 24, 304-320.
- Ibrahim LA, Shaghaleh H, El-Kassar GM, Abu-Hashim M, Elsadek EA, Alhaj Hamoud Y. 2023. Aquaponics: A Sustainable Path to Food Sovereignty and Enhanced Water Use Efficiency, *Water*, 15, 4310. DOI : [10.3390/w15244310](https://doi.org/10.3390/w15244310).
- Jamal M, Broom M, Al-Mur B, Al-Harbi M, Ghandourah M, Al-Otaibi A, Haque MDF. 2020. Biofloc Technology: Emerging Microbial Biotechnology for the Improvement of Aquaculture Productivity. *Polish Journal of Microbiology*, 69(4), 401-409. DOI : [10.33073/pjm-2020-049](https://doi.org/10.33073/pjm-2020-049).
- Metaxa E, Deviller G, Pagan P, Alliaume C, Casellas C, Blancheton JP. 2006. High rate algal pond treatment for water reuse in a marine fish recirculation system: Water purification and fish health, *Aquaculture*, 252, 92-101.
- Muangkeow B, Ikejima K, Powtongsook S, Gallardo W. 2011. Growth and nutrient conversion of white shrimp *Litopenaeus*

Note de synthèse

- vannamei* (Boone) and Nile tilapia *Oreochromis niloticus* L. in an integrated closed recirculating system, *Aquaculture Research*, 42, 1246-1260.
- Mugwanya M, Mahmoud AO, Dawood MAO, Kimera F, Sewilam H. 2021. Biofloc Systems for Sustainable Production of Economically Important Aquatic Species: A Review, *Sustainability*, 13, 7255.
- Neori A, Chopin T, Troell M, Buschmann AH, Kraemer GP, Halling C, Shpigel M, Yarish C. 2004. Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture, *Aquaculture*, 231, 361-391.
- Neori A, Shpigel M, Guttman L, Israel A. 2017. Development of Polyculture and Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA) in Israel: A Review. *The Israeli Journal of Aquaculture*, 69, 1385.
- Nisar U, Peng D, Mu Y, Yu Sun Y. 2022. A Solution for Sustainable Utilization of Aquaculture Waste: A Comprehensive Review of Biofloc Technology and Aquamimicry, *Frontiers in Nutrition*, 8, 791738. DOI : [10.3389/fnut.2021.791738](https://doi.org/10.3389/fnut.2021.791738).
- Ogello EO, Safina M, Musa SM, Aura CM, Jacob O, Abwao J, Mbonge Munguti J. 2014. An Appraisal of the Feasibility of Tilapia Production in Ponds Using Biofloc Technology: A review. *International Journal of Aquatic Science*, 2008-8019. 5(1), 21-39.
- Pauly D. 1976. The biology, fishery and potential for aquaculture of *Tilapia melanotheron* in a small West African lagoon, *Aquaculture*, 7, 33-49.
- Padeniya U, Davis DA, Wells DE, Bruce TJ. 2022. Microbial interactions, growth, and health of aquatic species in biofloc systems, *Water*, 14, 4019. DOI : [10.3390/w14244019](https://doi.org/10.3390/w14244019)
- Ritvo G, Kochba M, Avnimelech Y. 2004. The effects of common carp bioturbation on fishpond bottom soil, *Aquaculture*, 242, 345-356.
- Roel H, Verdegem CJ. 2011. Sustainable aquaculture in ponds: principles, practices and limits, *Livestock Science*, 139, 58-68.
- Schneider O, Sereti V, Eding EH, Verreth JAJ. 2005. Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems, *Aquacultural Engineering*, 32(3-4), 379-401.
- Troell M. 2009. *Integrated marine and brackish water aquaculture in tropical regions: research, implementation and prospects*. In D. Soto (ed.). A global review of integrated marine aquaculture, FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper. No. 529, Rome.
- Vinatea L, Carbó R, Andree KB, Gisbert E, Estévez A. 2023. Rearing European Eel (*Anguilla anguilla*) Elvers in a Biofloc System, *Animals*, 13, 3234. DOI : [10.3390/ani13203234](https://doi.org/10.3390/ani13203234).
- Verschuere L, Rombaut G, Sorgeloos P, Verstraete W. 2000. Probiotic bacteria as bio-control agents in aquaculture, *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 64(4), 655-671.
- Wasave SS, Chavan BR, Naik SD, Wasave SM, Pawase AS, Tibile RM, Ghode GS, Meshram SJ, Shivalkar VS. 2020. Role of microbes in biofloc systems: a review, *Journal of Experimental Zoology of India*, 23 (S1), 903-906.
- Wilfart A, Favalier N, Metaxa I, Platon C, Pouil S. 2020. *Integrated multi-Trophic Aquaculture in ponds: what environmental gain? An LCA point of view*. 12th International Conference on Life Cycle Assessment of Food 2020 (LCA Food 2020), Towards Sustainable Agri-Food Systems, Berlin (Germany), 206-208. hal-03219808.

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

Note de synthèse

Edité par

Anonyme

Rapporteurs

1. Anonyme
2. Anonyme
3. Philippe Chemineau, directeur de recherche émérite INRAe, membre de l'Académie d'agriculture de France.

Rubrique

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

Reçu

12 avril 2024

Accepté

30 juin 2024

Publié

23 août 2024

Citation

Gilles S. 2024. L'aquaculture intégrée multi-trophique (AIMT)-Integrated Multi-Trophic Aquaculture, *Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF)*, 18(2), 1-11. DOI : 10.58630/pubac.not.a784968.



Sylvain Gilles a intégré l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) en tant qu'ingénieur d'études pour mener des recherches aquacole en Afrique de l'Ouest puis en Amazonie. Pour le bureau d'études (Expertise Aquacole Tropicale (EAT), il effectue des missions au Sénégal et en Haïti pour la mise en place d'élevages de tilapias selon l'Aquaculture Intégrée Multi-Trophique (AIMT).

Adaptation des cultures au changement climatique : apport possible de l'édition génomique

Adaptation of crops to climate change: possible contribution of genome editing

André Gallais¹, Yves Lespinasse², Pierre Devaux³

1. Académie d'agriculture de France, andre.gallais@wanadoo.fr

2. Académie d'agriculture de France, yves.lespinasse@yahoo.fr

3. Groupe Florimond-Desprez, Académie d'agriculture de France, pierre.devaux@florimond-desprez.fr

Correspondance :

andre.gallais@wanadoo.fr

Résumé

Le changement climatique se traduit par un réchauffement avec des risques plus fréquents de sécheresse, et aussi par une grande variation spatiale et temporelle des conditions, avec des événements extrêmes. Pour adapter les cultures à ce changement, il faudrait des variétés végétales qui cumulent plusieurs types de tolérances, notamment aux fortes températures et au stress hydrique à différents stades de la vie de la plante, mais, aussi, des résistances à différents types de bio-agresseurs associés à ce changement climatique. En illustrant notre propos par différents exemples, nous montrons que les techniques d'édition du génome peuvent être un outil pour aider l'amélioration des plantes conventionnelles à obtenir plus rapidement de telles variétés. Dans la discussion, nous comparons la voie sélection de variétés adaptées à différentes conditions (dites variétés multi-adaptées), grâce à l'édition géno-

mique, à la voie mélange de variétés présentant des adaptations à différentes conditions climatiques et nous concluons que les deux approches peuvent être complémentaires.

Abstract

Climate change means warmer conditions, with more frequent risks of drought, but also a wide variation in conditions, with extreme events, from one year to the next. To adapt crops to this change, we need varieties that combine several types of tolerance, particularly to high temperatures and water stress at different stages of the plant life, as well as resistance to different types of bio-aggressors associated to this change. Using various examples, we show that genome-editing techniques can be a tool to assist conventional plant breeding in obtaining such

varieties more quickly. In the discussion, we compare the selection of varieties adapted to different conditions (called multi-adapted varieties), thanks to genome editing, with the mixture of varieties with adaptations to different climatic conditions, and we conclude that the two approaches can be complementary.

Mots-clés

changement climatique, édition du génome, variétés multi-adaptées, mélange de variétés

Keywords:

climate change, genome editing, multi-adapted varieties, variety mixtures

Introduction

Le changement climatique se caractérise d'abord par une forte tendance à un réchauffement, avec des risques de sécheresse marquée, mais également par une grande variation, voire une imprévisibilité des conditions climatiques avec des événements extrêmes d'une année à l'autre ou d'un lieu à un autre (par exemple, sécheresse marquée dans un lieu et excès de pluviométrie dans un autre). Pour adapter les cultures à ce changement, il faut les rendre à la fois plus tolérantes aux fortes températures, plus tolérantes à la sécheresse, voire à l'excès d'eau (meilleure tolérance à l'asphyxie racinaire), mais également résistantes à tous les bio-agresseurs (pathogènes, insectes, nématodes, etc.) qui accompagneront le changement climatique. Est-ce possible ?

L'amélioration des plantes classique peut contribuer, et a déjà contribué, à obtenir des variétés plus résistantes aux maladies, plus tolérantes à certains stress, mais la réponse pour certains caractères complexes, comme la tolérance au stress hydrique, est encore insuffisante, et cette voie ne permet pas une réponse assez rapide (Gallais, 2015). De surcroît, la nécessité de cumuler dans une même variété l'adaptation à différents facteurs du milieu allonge

encore le temps d'obtention de telles variétés. En complément de la sélection classique, les techniques d'édition génomique peuvent contribuer à procurer plus rapidement des variétés présentant des adaptations à différents facteurs du milieu biotique et abiotique (Nogué *et al.*, 2019).

Afin d'éclairer les apports et les limites de l'édition génomique à l'adaptation des variétés au changement climatique, nous rappelons d'abord ce que sont, dans les grands principes, les techniques d'édition du génome (NTG) ; puis nous illustrons par quelques exemples leurs contributions possibles à la création de variétés adaptées au changement climatique. Dans la partie discussion, nous comparons la voie d'obtention de variétés « multi-adaptées », c'est-à-dire qui présentent des adaptations à différents facteurs du milieu, à la voie mélange de variétés qui présentent des adaptations à différentes conditions climatiques. Nous concluons que les deux approches sont complémentaires, l'édition génomique pouvant permettre de produire des mélanges de variétés plus résilients.

Ce qu'est l'édition génomique ou l'édition d'allèles

Les techniques d'édition génomique se sont développées suite à la découverte, dans les années 2005-2010, d'enzymes, les méganucléases, et à la construction d'enzymes, les nucléases à doigts de zinc et les TALEN (*transcription activator-like effector nuclease*), puis en 2012 par le système CRISPR-Cas, qui peuvent couper la chaîne d'ADN en des points précis (Quétier, 2011 ; Jinek *et al.*, 2012). Elles marquent une rupture dans la création de variétés en amélioration des plantes, notamment grâce au système CRISPR-Cas, qui est la technique la plus simple d'utilisation, permettant, par l'utilisation d'une nucléase et d'un ARN guide, de couper la chaîne d'ADN en un point précis du génome, avec une faible probabilité de coupures hors du point voulu (Doudna et Charpentier, 2014) ; c'est aujourd'hui la technique la plus

utilisée. Comme les autres techniques (méganucléases, doigts de zinc et TALEN), elle permet de modifier de façon dirigée un gène ou plutôt un allèle, variante d'un gène à un locus. Nous préférons ici parler d'édition d'allèles plutôt que d'édition génomique, qui a un sens plus large. On parle aussi de mutagenèse ciblée ; l'édition d'allèles n'est en effet pas autre chose qu'un outil de mutagenèse, mais de mutagenèse ciblée.

Les modifications peuvent affecter la séquence codante de l'allèle et aussi les séquences régulatrices : délétion d'un ou plusieurs nucléotides, voire le remplacement d'un nucléotide par un autre (on parle alors de *base editing*) (Kim, 2018), ou remplacement d'une séquence de plusieurs nucléotides par une autre, comme avec le *prime editing* (Chen et Liu, 2023). Certaines de ces modifications alléliques sont incluses dans la catégorie NGT1 du projet de règlement de la Commission européenne, catégorie qui n'est pas considérée comme un OGM (Commission européenne, 2023 ; 2024).

Ces modifications de la séquence d'ADN sont de même nature que celles qui peuvent se produire naturellement par mutagenèse spontanée ou par mutagenèse artificielle, induite à l'aide de rayonnements ionisants ou de substances chimiques (comme le méthanesulfonate d'éthyle). En l'état actuel de nos connaissances, il est impossible de distinguer un allèle obtenu par mutagenèse dirigée, d'un allèle qui existe naturellement ou qui a été obtenu par mutagenèse artificielle, aléatoire. Un avantage important de la technique d'édition génomique est que plusieurs gènes peuvent être modifiés simultanément (on parle de multiplexage), ce qui est particulièrement intéressant pour modifier un gène chez une espèce allopolyploïde comme le blé (avec trois sous-génomes), le gène étant présent dans chaque sous-génome.

Les techniques d'édition génomique ont le grand avantage de permettre de modifier de manière ciblée un gène à un locus donné. Cependant, dans certains cas, elles peuvent induire, simultanément à la modification ciblée, des modifications dites « non-prédites » ou « hors-cibles ». Ces erreurs de modification sont un

argument retenu par les opposants à ces techniques. Avec les techniques récentes, celles-ci sont rares, et elles sont beaucoup plus rares en comparaison de celles qui sont produites par la mutagenèse artificielle, et cela même après une série de rétrocroisements pour tenter d'éliminer les allèles non désirés. Ces techniques permettent également de remplacer directement un allèle par un autre dans un génotype élite, sans passer par la longue méthode du rétrocroisement, et sans transmettre avec l'allèle désiré d'autres gènes (des centaines), dont certains peuvent avoir des effets défavorables. Ainsi, chez le pommier, la transmission d'un gène de résistance à la tavelure dans un fond génétique donné peut être obtenue en 5-6 ans, en utilisant la technique proposée par Yamagishi *et al.* (2014), contre 25-30 ans par la méthode classique du rétrocroisement (Figure 1). Au gain de temps s'ajoute le fait que le fond génétique de la nouvelle variété obtenue par édition génomique ne comporte que peu ou pas d'autres modifications que celle qui est ciblée (Gallais, 2015). L'intérêt principal des NTG est sans doute de permettre une meilleure utilisation de la variabilité génétique pour des caractères avec des gènes bien identifiés. Cette variabilité peut apparaître comme nouvelle, au sens de non encore observée chez l'espèce améliorée ou ses apparentés, mais elle peut exister, ou pourrait apparaître dans la diversité génétique naturelle par mutagenèse spontanée.

L'utilisation des techniques d'édition du génome nécessite cependant quelques prérequis qui font qu'elles ne peuvent pas être appliquées chez toutes les espèces ou tous les génotypes d'une espèce. Il faut en effet avoir identifié le ou les gènes impliqués dans le contrôle des caractères à améliorer ; il faut que le génome de l'espèce, voire du génotype modifié, ait été séquencé (pour détecter les modifications hors-cibles) et correctement annoté (accès à la séquence du ou des gènes), et il faut que, pour les techniques les plus utilisées, cette espèce ou le génotype de l'espèce se prête bien à la culture *in vitro* (par exemple régénération de plantes à partir de

protoplastes, ce qui, notamment, n'est pas possible pour tous les génotypes de maïs). Une autre solution qui ne passe pas par l'étape *in vitro*, lorsque le greffage est possible, est de transformer le porte-greffe qui portera la machinerie génétique CRISPR-Cas ; la migration du système CRISPR-Cas, nucléase + ARN guide, au niveau du greffon, induira la mutagenèse et la mutation est directement exploitée au niveau des graines portées par le greffon (Yang *et al.*, 2023).

Quelques exemples de mutagenèse dirigée pour l'adaptation au changement climatique

Les exemples de caractères d'intérêt pour l'agriculture, le consommateur et la protection de l'environnement, obtenus par les techniques d'édition génomique, commencent à être nombreux sur différentes espèces (Ricroch *et al.*, 2017 ; Shipra *et al.*, 2024). En ce qui concerne l'adaptation de variétés au changement climatique, certains travaux ouvrent des voies ; nous n'en donnons ci-dessous que quelques exemples illustratifs des possibilités offertes par ces techniques. Nous distinguons ceux qui sont relatifs à des facteurs biotiques (bio-agresseurs des plantes) et ceux qui sont relatifs aux facteurs abiotiques (sécheresse, température, salinité). Enfin nous verrons une autre application de l'édition d'allèles pour l'adaptation au changement climatique, pour la diversification des espèces cultivées, voire pour la re-domestication (ou néo-domestication) d'espèces abandonnées ou la domestication d'espèces « sauvages » naturellement adaptées au changement climatique. Le critère pris pour l'adaptation aux conditions climatiques est souvent le rendement pour la production considérée de différentes espèces.

Exemples d'adaptation au milieu biotique

Par environnement biotique, il faut comprendre essentiellement les agents pathogènes, les insectes et les nématodes. C'est à ce jour, le

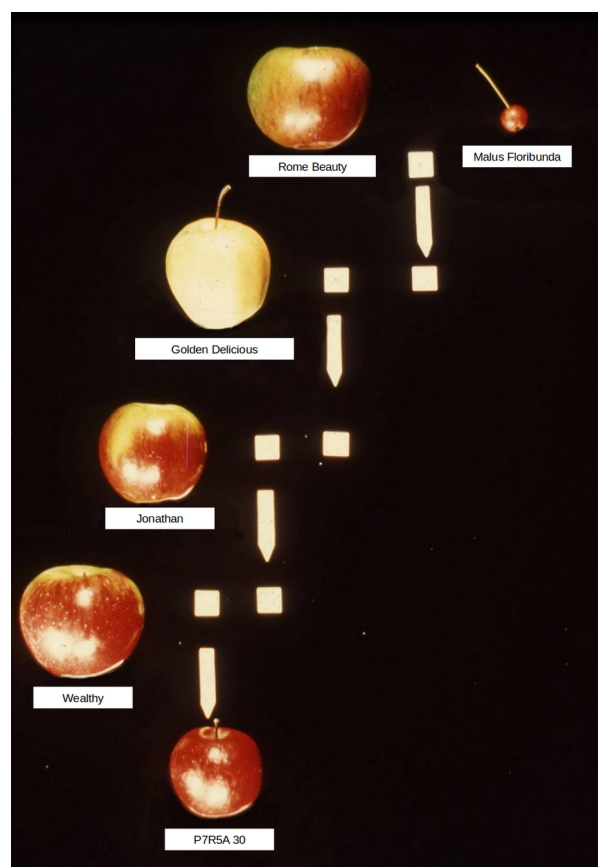


Figure 1. Le rétrocroisement chez le pommier permet de transmettre la résistance à la tavelure apportée par le pommier sauvage *Malus floribunda*. A chaque génération de rétrocroisement, les plantes résistantes sont recroisées avec une variété différente afin d'éviter tout développement de consanguinité dans la variété finale. Le processus prend au total 25 à 30 ans. Avec l'édition génomique, la durée du transfert peut être réduite à 5 ans et avec un meilleur résultat (Photo INRAE Angers).

domaine dans lequel on trouve le plus d'exemples d'utilisation des NTG, souvent par extinction d'un allèle. Par ces techniques on a obtenu des allèles de résistance aux maladies qui peuvent se développer plus avec le changement climatique (Rato *et al.*, 2021). Par exemple, chez le blé, l'allèle de sensibilité à

l'oïdium *Mlo* a pu être modifié pour générer un allèle de résistance (il a fallu pour cela, induire une mutation sur chaque sous-génome du blé, le génome du blé étant formé de trois sous-génomes homéologues (nommés A, B et D) ce qui n'est pas possible avec les méthodes de sélection traditionnelles) (Shengnan *et al.*, 2022). Chez la tomate, la vigne et le pommier (Pessina *et al.*, 2016a ; 2016b), espèces où le gène *Mlo* est présent, en utilisant la même démarche, il a été possible d'obtenir des plantes avec une résistance partielle ou totale à l'oïdium. De plus, la résistance à l'oïdium contrôlée par un allèle particulier du gène *Mlo*, d'abord identifiée chez l'orge, est connue pour être durable, ce qui est un avantage dans un environnement climatique changeant.

La possibilité d'obtenir des résistances à certains virus (souvent transmis par des insectes, comme les pucerons et les cicadelles) est sans doute un exemple plus illustratif pour l'adaptation au changement climatique. Ainsi, chez le riz, la résistance au virus de la panachure jaune (RYMV), l'une des principales maladies du riz, a été obtenue par l'utilisation des techniques de mutagenèse dirigée (Arra *et al.*, 2024). On peut citer aussi les travaux de Rollwage *et al.* (2024), qui ont permis d'obtenir, chez la betterave sucrière, la résistance au virus de la jaunisse chlorotique (Figure 2).

Dans tous ces cas, ces résistances permettront de réduire l'utilisation des fongicides, avec comme conséquence, un meilleur respect de l'environnement.

Le changement climatique peut aussi favoriser l'adaptation et l'explosion de populations naturelles de certains insectes ou de nématodes, déjà présents ou issus de régions plus chaudes. L'édition d'allèles peut, là encore, aider à élaborer des résistances efficaces contre des bioagresseurs pour lesquels l'arsenal génétique connu chez la plante hôte est dépourvu de solution efficace. Ainsi, chez le riz, la résistance aux cicadelles et aux foreurs de tiges a été obtenue en supprimant la production de sérotonine (un neurotransmetteur, dont la synthèse par la plante est stimulée par les

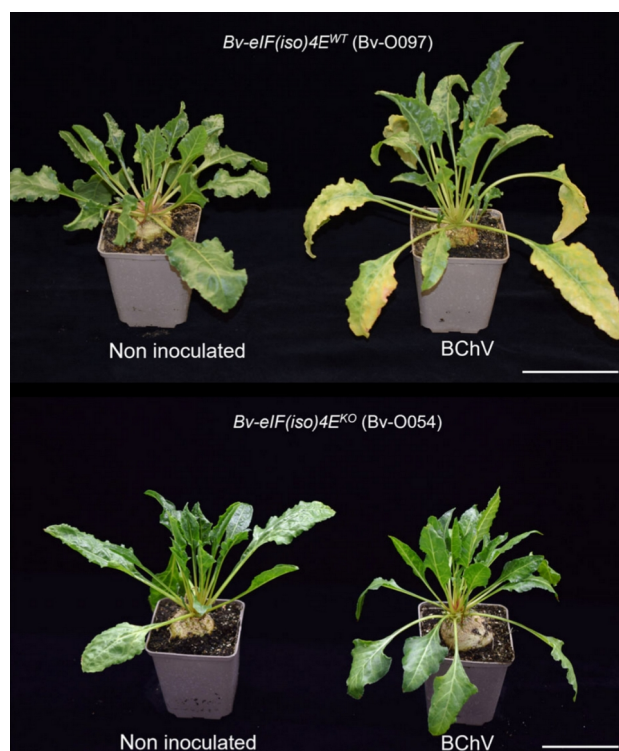


Figure 2. Obtention par édition génomique, chez la betterave sucrière, de la résistance au virus de la jaunisse chlorotique ou BChV (Beet Chlorosis Virus). En haut, plantes non éditées, en bas plantes éditées ; à gauche plantes non inoculées avec le virus, à droite plantes inoculées. On peut remarquer un feuillage plus sain pour la plante éditée et inoculée (en bas à droite de la photo) (crédit Rollwage *et al.*, 2024).

insectes de façon à favoriser leur développement) (Lu *et al.*, 2018). Il en résulte cependant une diminution du rendement en grains d'environ 15 %, à comparer au risque élevé de perte d'une grande partie, voire de la totalité, de la récolte. Les attaques de nématodes peuvent également être plus fréquentes avec le changement climatique. Chez la tomate, le concombre, le riz et le soja, une résistance aux nématodes a été obtenue par modification d'un gène de sensibilité (Dutta *et al.*, 2023).

Exemples d'adaptation au milieu abiotique

Les exemples d'utilisation de l'édition d'allèles pour générer des génotypes ou variétés plus tolérantes à des stress abiotiques associés au changement climatique, notamment la sécheresse, se multiplient, mais avec des résultats plus ou moins nets (Yadav *et al.*, 2023). Les caractères à améliorer sont en effet génétiquement et physiologiquement plus complexes que les résistances aux bio-agresseurs, et de ce fait, plus difficiles à modifier afin d'obtenir une amélioration notable. La difficulté est d'avoir une adaptation au stress sans diminution de rendement en l'absence de stress. De plus, il sera sans doute nécessaire de cumuler plusieurs modifications d'allèles.

Un premier exemple d'amélioration de la tolérance au stress hydrique par l'édition d'allèles est celui de la modification du gène de régulation *Argos8* (qui régule la production d'éthylène en cas de stress hydrique) chez le maïs : une augmentation du rendement en grain de 3,1 q/ha (environ 4 %) a été obtenue lors d'un stress hydrique à floraison (stade de sensibilité du maïs), sans effet défavorable, lorsqu'il n'y a pas de sécheresse (Shi *et al.*, 2017). Le gain de rendement peut paraître limité, mais il pourra être combiné avec d'autres améliorations obtenues soit par édition d'allèles, soit par voie classique. La modification a été réalisée par remplacement de la séquence promotrice native du gène ciblé par une séquence promotrice issue d'un autre gène du maïs. De ce fait, il n'est pas sûr que cela relève de la catégorie NGT1 de la Commission européenne ; cependant, des travaux d'édition plus fins pourraient sans doute conduire à une modification relevant des NGT1.

Un autre exemple d'édition d'allèles pour la tolérance au stress hydrique est donné par les travaux d'Ogata *et al.* (2020) chez le riz. Dans cet exemple, la mutation dirigée du gène *OsERA1* (régulateur de l'acide abscissique) a permis d'obtenir des allèles augmentant à la fois la réponse à l'acide abscissique, la tolérance au stress hydrique *via* la régulation stomatique et la croissance racinaire en l'absence de stress

hydrique. Cependant la fermeture des stomates pourrait avoir un effet négatif sur la photosynthèse et, donc, sur le rendement ; c'est donc une modification à utiliser en combinaison avec d'autres ainsi qu'avec la sélection conventionnelle pour en limiter les effets négatifs. Cet exemple illustre la complexité du caractère « tolérance à la sécheresse » : il faut agir sur plusieurs mécanismes à la fois, et éviter les effets négatifs en l'absence de stress hydrique (Gallais, 2015).

Le même type de résultats a été obtenu chez le riz en modifiant les gènes de *SRL1* et *SRL2* qui contrôlent l'enroulement des feuilles : chez les mutants obtenus, la transpiration et la conductance des stomates sont plus faibles, et il y a une meilleure protection des tissus et une meilleure survie en cas de sécheresse, mais avec une diminution du rendement d'environ 10 % en l'absence de stress hydrique (Liao *et al.*, 2019). L'agriculteur doit alors choisir entre le risque d'une perte importante, voire totale, de la récolte en cas de sécheresse et une diminution limitée du potentiel de rendement en l'absence de sécheresse ; le choix dépendra de la fréquence de la sécheresse.

Une autre piste est donnée chez le blé, où l'architecture du système racinaire a été modifiée par action sur les gènes *OPR111* (connus pour agir sur la croissance racinaire) ; l'architecture racinaire obtenue pourrait permettre une meilleure tolérance à la sécheresse et aussi une meilleure absorption des éléments nutritifs du sol, notamment de l'azote (Gabay *et al.*, 2023).

On peut aussi citer l'adaptation à la salinité du riz non irrigué (souvent associée à la tolérance à la sécheresse), les problèmes de salinité des sols risquant de se multiplier avec le changement climatique. Dans ce cas, *via* des modifications générées par mutation dirigée du gène *OsRR22* (codant un facteur de transcription régulant le métabolisme de la cytokinine), Zhang *et al.* (2019) ont obtenu une variété présentant une meilleure tolérance au stress salin, apparemment sans effet défavorable en l'absence de stress.

En ce qui concerne l'adaptation aux températures élevées, on peut donner

l'exemple de la tomate, plante très sensible aux fortes températures, chez laquelle l'extinction, par l'emploi du système CRISPR-Cas9, du gène *SIMAPK3* (qui code une protéine kinase impliquée dans différents stress) augmente de façon significative la tolérance au stress forte température avec une meilleure protection de l'intégrité cellulaire (Yu *et al.*, 2019).

L'édition d'allèles pour la diversification des espèces et des variétés cultivées

L'édition d'allèles peut être un outil facilitant l'amélioration d'espèces dites « orphelines » (sans sélectionneurs, et donc sans programmes de sélection), de façon à diversifier les espèces cultivées et la diversité des adaptations, en introduisant rapidement dans le génome de ces espèces des allèles de résistance aux bioagresseurs ou des allèles de rythmes de développement (précocité) qu'elles ne posséderaient pas. Dans le même esprit, l'édition d'allèles peut être un outil puissant, en combinaison avec la sélection conventionnelle, pour réaliser une domestication assez rapide d'espèces « sauvages », ou dont la culture aurait été abandonnée depuis le début de la domestication, espèces qui pourraient être naturellement bien adaptées au changement climatique, notamment à la sécheresse et aux températures élevées (Kwon *et al.*, 2020 ; Yu *et al.*, 2021 ; Parcy, 2024).

On sait en effet que la domestication des plantes a en général porté sur un nombre limité de gènes (Gallais, 2013). Compte tenu de la complexité génétique et physiologique des caractères impliqués dans l'adaptation des plantes cultivées aux facteurs abiotiques associés au changement climatique (sécheresse, température élevée, etc.) (Gallais, 2015), cette stratégie serait complémentaire (et peut être avec plus de chance de succès) de celle qui consiste à améliorer la tolérance au stress des espèces cultivées en leur conférant des mécanismes d'adaptation à ces facteurs abiotiques.

Discussion-conclusion

À travers les quelques exemples donnés, et certaines perspectives, il apparaît que l'édition d'allèles pourrait aider, en combinaison avec la sélection classique, à obtenir des variétés, voire des espèces, mieux adaptées au changement climatique, par exemple résistantes à de nouvelles maladies ou plus généralement à de nouveaux bio-agresseurs, et aussi plus économes en eau ou plus tolérantes à de fortes températures, notamment. Si les gènes de différents mécanismes d'adaptation à différents milieux ont été identifiés, l'édition génomique peut être un moyen assez rapide pour réunir plusieurs allèles intéressants dans un même génotype, grâce aux possibilités de multiplexage. On pourrait alors, à moyen terme, parler de variétés « multi-adaptées ».

À court terme, l'édition d'allèles peut surtout servir à réunir dans une même variété, des allèles de résistance ou tolérance à différents facteurs biotiques amenés par le changement climatique (agents pathogènes, insectes, nématodes). Pour l'adaptation aux facteurs abiotiques, plus complexes, l'obtention de variétés adaptées pourra se faire de façon plus progressive en agissant sur les gènes qui contrôlent certains mécanismes et qui seront de plus en plus identifiés, de même que leurs séquences régulatrices (Zhang *et al.*, 2023) et cela en synergie avec la sélection conventionnelle.

Une autre stratégie pour obtenir des cultures résilientes au changement climatique peut être envisagée, celle de la culture en mélange de variétés présentant chacune des adaptations aux différentes conditions qui pourront être rencontrées par la culture (Litrico et Violle, 2015 ; Barot *et al.*, 2017). Le principe est simple, il s'agit d'avoir, quelles que soient les conditions climatiques, des plantes du peuplement végétal cultivé qui sont adaptées aux conditions de l'année. C'est donc une solution qui peut assurer une production minimale, une régularisation des rendements entre années, mais encore faut-il qu'il y ait dans le peuplement végétal des plantes

adaptées aux conditions en cours. Dans cette approche il faut donc disposer de variétés présentant des adaptations aux différentes conditions climatiques susceptibles d'être rencontrées selon les années. Comme nous l'avons vu précédemment, l'édition d'allèles peut aider à mettre au point de telles variétés, en complément de la sélection classique.

Cependant la voie « mélange de variétés » présente deux inconvénients : (1) elle se traduit par la culture d'un peuplement hétérogène, ce qui ne permet pas toujours de bien standardiser les conditions de culture et peut poser un problème pour l'utilisation des produits de la récolte, et (2) en théorie, par rapport à la solution culture d'une variété multi-adaptée, elle va se traduire, en moyenne, par une perte de rendement (Gallais, 2015).

En effet, lorsque les gènes d'adaptation à différentes conditions sont connus, la différence entre la voie mélange de variétés et la voie variété multi-adaptée est qu'avec la voie variété multi-adaptée les gènes d'adaptation sont réunis dans un même génotype au lieu d'être chez des plantes différentes avec la voie mélange. On peut aussi dire que la diversité inter-plante est remplacée par une diversité génétique intra-génotype. Ainsi, la variété multi-adaptée permettra un bon rendement quelles que soient les conditions. Elle peut donc être une solution pour concilier productivité et homogénéité.

Avec la voie mélange, pour en limiter les inconvénients, on peut chercher à associer des variétés très proches, mais ayant des gènes différents contrôlant différents mécanismes d'adaptation au stress hydrique par exemple. C'est d'ailleurs en partie le principe mis en application dans l'association de variétés de blé résistantes à différentes souches d'agents pathogènes, afin de limiter les traitements fongicides (Vidal *et al.*, 2021).

Ainsi, la stratégie d'édition d'allèles et la stratégie d'utilisation d'associations raisonnées de variétés apparaissent comme deux approches complémentaires. Les variétés multi-adaptées sont longues à obtenir par sélection classique. Les techniques d'édition d'allèles, en complément à

cette sélection, peuvent aider à réunir assez rapidement dans un même fond génétique des allèles contrôlant différents mécanismes d'adaptations, pour des mécanismes bien caractérisés, déterminés par un nombre limité de gènes et génétiquement indépendants. De telles variétés pourront alors être cultivées en culture « pure » ou en association, si l'association présente un intérêt. Cela illustre la complémentarité des deux approches, deux outils de natures très différentes pour aider l'agriculture à répondre aux enjeux de l'adaptation au changement climatique et à la transition agroécologique.

D'une façon plus générale, face aux enjeux de l'agriculture (adaptation au changement climatique, respect de l'environnement, maintien de la biodiversité), un seul levier d'action (par exemple le levier génétique ou le levier « mélange de variétés ») ne peut pas permettre d'y répondre correctement ; seules des solutions intégratives, pluridisciplinaires, associant différents leviers (génétique, agronomique, économique...) pourront conduire à une agriculture durable.

Remerciements

Les auteurs remercient Yvette Dattée, membre de l'Académie d'agriculture de France, Fabien Nogué, directeur de recherche INRAE et Thierry Langin, directeur de recherche CNRS, pour leur relecture et correction du texte.

Références

Arra Y, Auguy F, Stiebner M, Cheron S, Wudick MM, Miras M, Schepler-Luu V, Kohler S, Cunnac S, Frommer WB, Albar L. 2024. Rice yellow mottle virus resistance by genome editing of the *Oryza sativa* L ssp *japonica* nucleoporin gene *OsCPR5.1* but not *OsCPR5.2*, *Plant Biotechnology Journal*, 22, 1299-1311.

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

- Barot S, Allard V, Cantarel A, Enjalbert J, Gauffreteau A, Goldringer I, Lata JC, Le Roux X, Niboyet A, Porcher E. 2017. Designing mixtures of varieties for multifunctional agriculture with the help of ecology. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 37, 13.
- Commission européenne. 2023. Annexes de la proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil concernant les « Végétaux obtenus au moyen de certaines nouvelles techniques génomiques, et les denrées alimentaires et aliments pour animaux qui en sont dérivés », 5 juillet 2023. https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13119-Legislation-applicable-aux-vegetaux-produits-a-laide-de-certaines-nouvelles-techniques-genomiques_fr.
- Commission européenne. 2024. Végétaux obtenus au moyen de certaines nouvelles techniques génomiques, et les denrées alimentaires et aliments pour animaux qui en sont dérivés. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/T-A-9-2024-0067_FR.pdf
- Chen PJ, Liu DR. 2023. Prime editing for precise and highly versatile genome manipulation, *Nature Reviews genetics*, 24, 161-177.
- Doudna JA, Charpentier E. 2014. The new frontier of genome engineering with CRISPR-cas9, *Science*, 346, 1258096. DOI : 10.1126/science.
- Dutta TK, Ray S, Phani V. 2023. The status of the CRISPR/Cas9 research in plant nematode-interactions, *Planta*, 258, 6, 103.
- Gabay G, Wang H, Zhang J, Moriconi JI, Burguener GF, Gualano LD, Howell T, Lukaszewski A, Staskawicz B, Cho MJ, Tanaka J, Fahima T, Ke H, Dehesh K, Zhang GL, Gou JY, Hamberg M, Santa-Maria GE, Dubcovsky J. 2023. Dosage differences in 12-oxophytodienoate reductase genes modulate wheat root growth, *Nature Communications*, 14, 539, 1-15. DOI : 10.1038/s41467-023-36248-y.
- Gallais A. 2013. *De la domestication à la transgénèse. Évolution des outils pour l'amélioration des plantes*, Éditions Quae, Versailles, 171 p.
- Gallais A. 2015. *Comprendre l'amélioration des plantes. Enjeux, méthodes objectifs et critères de sélection*, Éditions Quae, Versailles, 231 p.
- Jinek M, Chylinski K, Fonfara I, Hauer M, Doudna JA, Charpentier E. 2012. A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity, *Science*, 337(6096), 816-821. DOI : 10.1126/science.1225829.
- Kim JS. 2018. Precision genome engineering through adenine and cytosine base editing, *Nature Plants*, 4, 148-151.
- Kwon CT, Heo J, Lemmon ZH, Capua Y, Hutton SF, Van Eck J, Liao S, Park SJ, Lippman ZB. 2020. Rapid customization of *Solanaceae* fruit crops for urban agriculture, *Nature Biotechnology*, 38, 182-188.
- Liao S, Qin X, Luo L, Han Y, Wang X, Usman B, Nawaz G, Zhao N, Liu Y, Li R. 2019. CRISPR/Cas9-induced mutagenesis of semi-rolled leaf 1,2 confers curled leaf phenotype and drought tolerance by influencing protein expression patterns and ROS scavenging in rice (*Oryza sativa* L.), *Agronomy*, 9, 728. DOI : 10.3390/agronomy9110728.
- Litrice I, Violle C. 2015. Diversity in plant breeding: a new conceptual framework, *Trends in Plant Science*, 20, 604-f613.
- Lu HP, Luo T, HW, Wang L, Tan YY, Huang JZ, Wang Q, Ye GY, Gatehouse AMR, Lou YG, Shu QY. 2018. Resistance of rice to insect pests mediated by suppression of serotonin biosynthesis, *Nature Plants*, 4, 6, 338-344.
- Nogué F, Vergne P, Chèvre AM, Chauvin JE, Bouchabke-Coussa O, Déjardin A, Chevreau E,

- Hibrand-Saint Oyant L, Mazier M, Barret P, Guiderdoni E, Sallaud C, Foucrier S, Devaux P, Rogowsky PM. 2019. Crop plants with improved culture and quality traits for food, feed and other uses, *Transgenic research*. 28, 65-73.
- Ogata T, Ishizaki T, Fujita M, Fujita Y. 2020. CRISPR/Cas9-targeted mutagenesis of *OsERA1* confers enhanced responses to abscissic acid and drought stress and increased primary root growth under non stressed conditions in rice, *PLoS One*, 15(12), e0243376. DOI : 10.1371/journal.pone.0243376
- Parcy F. 2024. *Les Clés des champs. Comment domestiquer les plantes*, Éditions humenSciences, Paris, 237 p.
- Pessina S, Angeli D, Martens S, Visser RGF, Bai Y, Salamini F, Velasco R, Schouten HJ, Malnoy M. 2016a. The knockdown of the expression of *MdMLO19* reduces susceptibility to powdery mildew (*Podosphaera leucotricha*) in apple (*Malus domestica*), *Plant Biotechnology Journal*, 14, 2033-2044.
- Pessina S, Lenzi L, Perazzolli M, Campa M, Dalla Costa L, Urso S, Valè G, Salamini F, Velasco R, Malnoy M. 2016b. Knockdown of *MLO* genes reduces susceptibility to powdery mildew in grapevine, *Horticultural Research*, 3, 16016; DOI : 10.1038/hortres.2016.16.
- Quétier F. 2011. Modes d'obtention des variétés tolérantes aux herbicides. In Rapport ESCo « Variétés végétales tolérantes aux herbicides », INRA.
- Rato C, Carvalho MF, Azevedo C, Oblessuc PR. 2021. Genome editing for resistance against plant pests and pathogens, *Transgenic research*, 30, 4, 427-459.
- Ricroch A, Clairand P, Harwood W. 2017. Use of CRISPR systems in plant genome editing: toward new opportunities in agriculture, *Emerging Top Life Science*, 1, 169-182.
- Rollwage L, Van Houtte H, Hossain R, Wynant N, Willems G, Varrelmann M. 2024. Recessive resistance against beet chlorosis virus is conferred by the eukaryotic translation initiation factor (iso)4E in *Beta vulgaris*, *Plant Biotechnology Journal*, DOI : [10.1111/pbi.14333](https://doi.org/10.1111/pbi.14333).
- Shengnan L, Dexing L, Yunwei Z, Min D, Yongxing C, Bin L, Boshu L, Yuan L, Yanpeng W, Long Z, Yueting L, Jinxing L, Kunling C, Zhiyong L, Jun X, Jin-Long Q, Caixia G. 2022. Genome-edited powdery mildew resistance in wheat without growth penalties, *Nature*, 602, 455-460.
- Shi J, Gao H, Wang H, Lafitte HR, Archibald RL, Yang M, Hakimi SM, Mo H, Habben JE. 2017. ARGOS8 variants generated by CRISPR-Cas9 improve maize grain yield under field drought stress conditions, *Plant Biotechnology Journal*, 15, 207-216.
- Shipra S, Sushmita LC, Yeluru MB, Dharmappa DC, Emmadi V, Sayanti M, Ishfaq MH, Vikas MM, Tulika M. 2024. Commercialization of CRISPR-edited crops: Opportunities and challenges. In Abd-Elsalam KA, Ahmad A, Zhang B (eds) *CRISPRized Horticulture Crops. Genome Modified Plants and Microbes in Food and Agriculture*, Academic Press, Cambridge (MA), USA, Chapter 27, 471-486, DOI :10.1016/B978-0-443-13229-2.00031-4.
- Vidal T, Gauffreteau A, Enjalbert J, Suffert F. 2021. Mélanger les variétés pour construire des peuplements plus résistants aux bioagresseurs. In Lannou C, Roby D, Ravigné V, Hannachi M, Moury B (eds) *L'Immunité des plantes*, Éditions Quae, Versailles, 390 p.
- Yadav RK, Tripathi MK, Tiwari S, Tripathi N, Asati R, Chauhan S, Tiwari PN, Payasi DK. 2023. Genome editing and improvement of abiotic stress tolerance in crop plants, *Life*, 13, 1456. DOI : 10.3390/life13071456.
- Yamagishi N, Kishigami R, Yoshikawa N. 2014. Reduced generation time of apple seedlings to

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

within a year by means of a plant virus vector: a new plant breeding technique with no transmission of genetic modification to the next generation, *Plant Biotechnology Journal*, 12, 60-68.

Yang L, Machin F, Wang S, Saploura E, Kragler F. 2023. Heritable transgene-free genome editing in plants by grafting of wild-type shoots to transgenic donor rootstocks, *Nature Biotechnology*, 41, 958-967.

Yu H, Lin T, Meng X, Du H, Zhang J, Liu G, Chen M, Jing Y, Kou L, Li X, Gao Q, Liang Y, Liu X, Fan Z, Liang Y, Cheng Z, Chen M, Tian Z, Wang Y, Chu C, Zuo J, Wan J, Qian Q, Han B, Zuccolo A, Wing RA, Gao C, Liang C, Li J. 2021. A route to *de novo* domestication of wild allotetraploid rice, *Cell* 184 (5), 1156-1170.

Yu W, Wang L, Zhao R, Sheng J, Zhang S, Li R, Shen L. 2019. Knockout of SIMAPK3 enhances tolerance to heat stress involving ROS homeostasis in tomato plants, *BMC Plant Biology*, 19, 354. DOI : 10.1186/s12870-019-1939-z

Zhang A, Liu Y, Wang F, Li T, Chen Z, Kong D, Bi J, Zhang F, Luo X, Wang J, Tang J, Yu X, Liu G, Luo L. 2019. Enhanced rice salinity tolerance via CRISPR/Cas9-targeted mutagenesis of the *OsRR22* genes, *Molecular Breeding*, 39, 47. DOI : 10.1007/s11032-019-0954-y.

Zhang J, Xiong H, Burguener GF, Vasquez-Gross H, Liu Q, Debernardi JM, Akhunova A, Garland-Campbell K, Kianian SF, Brown-Guedira G, Pozniak C, Faris JD, Akhunov E, Dubcovsky J. 2023. Sequencing 4.3 million mutations in wheat promoters to understand and modify gene expression, *PNAS*, 120 (38), e2306494120.

d'agriculture de France.

Editeur :

Anonyme

Rapporteurs :

1. Anonyme
2. Anonyme

Reçu

26 avril 2024

Accepté

15 juillet 2024

Publié

20 septembre 2024

Citation

Gallais A, Lespinasse Y, Devaux P. 2024. Adaptation des cultures au changement climatique : apport possible de l'édition génomique, *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France - Academic Notes of the French Academy of Agriculture (N3AF)*, 18(3), 1-12. DOI : 10.58630/pubac.not.a880244.



Rubrique

Cet article a été publié dans la rubrique « Points de vue » des *Notes académiques de l'Académie*

André Gallais est professeur honoraire à AgroParisTech, 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)
Point de vue



Yves Lespinasse est directeur de recherche honoraire INRAe, membre de l'Académie d'agriculture de France.



Pierre Devaux est directeur Recherche et Innovation du Groupe Florimond-Desprez, membre de l'Académie d'agriculture de France,

Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France

Academic Notes of the French Academy of agriculture

Authors

Claude Debru

Title of the work

La science, de l'erreur à la fraude. Le cas de Lyssenko. Science, from error to fraud.

Year 2024, Volume 17, Number 4, pp. 1-9

Published online:

12 November 2024,

<https://www.academie-agriculture.fr/publications/notes-academiques/la-science-de-lerreur-la-fraude-le-cas-de-lyssenko-science-error>

[La science, de l'erreur à la fraude. Le cas de Lyssenko. Science, from error to fraud.](#) © 2024 by

Claude Debru is licensed under [Creative Commons Attribution 4.0 International](#) 

La science, de l'erreur à la fraude. Le cas de Lyssenko

Science, from error to fraud. The Lyssenko case

Claude Debru¹

1 Membre de l'Académie d'agriculture de France, professeur émérite de philosophie des sciences à l'École normale supérieure.

Correspondance: claude.debru@ens.fr

Résumé

Cette étude commence par une analyse philosophique générale de l'erreur et de ses causes, complétée par des précisions tirées des sciences de la vie, où les erreurs sont nombreuses, qu'il s'agisse d'erreurs expérimentales, d'erreurs d'interprétation ou d'erreurs par ignorance. Le cas de l'agronome soviétique Trofim Lyssenko est discuté ; il relève plutôt de la pseudo-science en raison de sa négligence des normes épistémologiques élémentaires de la recherche scientifique en matière de reproductibilité des résultats, d'ignorance délibérée des résultats contraires à ses thèses et des exigences de la preuve, enfin de fraude avérée dans la surestimation des résultats à l'intention du pouvoir politique.

Abstract

This study starts with a general philosophical analysis of error and its causes, supplemented by details drawn from the life sciences, where there are many errors:

whether experimental errors, errors of interpretation or errors of ignorance. The case of the soviet agronomist Trofim Lyssenko is then discussed, as an example of pseudo-science resulting from his neglect of the basic epistemological norms of scientific research regarding reproducibility, deliberate ignorance of contrary results and requirements of proof, and finally of established fraud in overestimating results to the benefit of political power.

Mots clés

agronomie, épistémologie, erreur, fraude, Trofim Lyssenko, reproductibilité des résultats, exigences de preuve, Nikolai Vavilov.

Key words

agronomy, epistemology, error, fraud, Trofim Lyssenko, reproducibility of results, proof requirements, Nikolai Vavilov.

Note de recherche

Que l'erreur fasse partie de la démarche de connaissance scientifique, qu'elle soit particulièrement fréquente dans les sciences expérimentales, et que les sciences soient capables de corriger leurs propres erreurs sont des faits largement reconnus ainsi que des caractères spécifiques rarement retrouvés dans les autres champs du savoir. Comme l'a écrit Ernst Mach : « *Vérité et erreur ont les mêmes sources psychiques : seul, le succès permet de les séparer l'une de l'autre. Une erreur clairement reconnue est, à titre de correctif, aussi précieuse pour la science qu'une vérité* » (Mach, 1917).

Le propos cette note est double : explorer la nature et les causes des erreurs à l'aide de la philosophie, dont c'est l'un des grands thèmes ; l'illustrer dans le cas de l'agronomie, en revenant sur l'agronome soviétique Trofim Lyssenko (1898-1976), chez lequel l'erreur est intimement liée à la fraude. Dans la présente note, c'est la perspective épistémologique sur l'erreur et ses causes qui est principalement adoptée, de préférence à une analyse des conditions politiques de sa persistance.

La philosophie face à l'erreur

Dans sa grande majorité, la tradition philosophique est attachée à conserver l'idée de vérité comme valeur, sans pouvoir toujours la définir unanimement. Quelles que soient les nombreuses discussions entre les philosophes, la vieille conception de la vérité comme adéquation de la chose et de l'intellect subsiste, avec pour conséquence que la vérité existe bel et bien et que la tâche de notre entendement est de la découvrir. Cette conviction peut être aisément partagée par quiconque s'est frotté aux sciences de la vie.

Fort éloigné d'une telle conception, le « relativisme cognitif » est une invention récente de la sociologie des sciences. Parmi les philosophes les plus proches des sciences de la vie au siècle dernier, et particulièrement sensible aux questions agricoles par ses origines, Georges Canguilhem a abordé l'erreur dans des cours donnés à la faculté des lettres de l'université de Strasbourg repliée à

Clermont-Ferrand en 1943-1944. Il le constate : « *L'examen des conditions d'existence et de conscience de l'erreur est au centre d'une théorie de la connaissance* ». Le problème de la nature de l'erreur se pose d'une manière générale dans la philosophie « ontologique », celle qui considère l'être de l'objet. En effet : « *Connaître c'est pour le sujet devenir l'objet, le posséder. Connaître une chose c'est être cette chose.* »

Dans un tel cadre de pensée, l'existence de l'erreur pose, selon Canguilhem, un véritable problème. « *Comment expliquer, si c'est l'objet qui détermine dans le sujet les modalités du connaître, que l'erreur puisse avoir lieu ? Comment admettre que l'objet se donne pour autre qu'il n'est, si la connaissance n'est que réception et assimilation d'un donné ?* » (Canguilhem, 1943, f°2). Selon lui, la perspective ontologique « va de pair avec le dogmatisme ».

Or la science s'est construite contre le dogmatisme. C'est donc une autre perspective, plus historique, qu'il convient d'adopter, celle qui sera reconnue plus tard comme épistémologie historique. D'où la légitimité de l'histoire des sciences. « *Il faut expliquer pourquoi l'erreur s'ignore comme telle et se prend pour son contraire. Il n'y a pas de conscience immédiate mais conscience réfléchie ou médiate de l'erreur. C'est toujours un savoir qui fait apparaître corrélativement l'erreur* » (Canguilhem, 1943, f°9). « *Il suit de là qu'une erreur consciente d'elle-même, c'est-à-dire le jugement accompagné de l'appréciation de lui-même, nous renvoie au passé de la connaissance. Il en résulte une définition de l'histoire des sciences comme "histoire des obstacles et des erreurs"* » Si une vérité provisoire chasse une erreur, cette dernière vérité peut être l'erreur de demain : « *Le vrai d'hier est l'erreur d'aujourd'hui ; mais ce même rapport envisagé dans l'avenir à partir du présent nous conduit à soupçonner que le vrai d'aujourd'hui peut être l'erreur de demain* » (Canguilhem, 1943, f°12). Certes, à lire Canguilhem de près, c'est bien d'une possibilité qu'il s'agit, et non d'une réalité universelle.

Ces considérations générales étant posées, Canguilhem se livre à une tentative de

Note de recherche

« délimitation » et de classification des espèces et sous-espèces d'erreurs : erreurs de perception ; erreurs dans les sciences mathématiques (erreurs de calcul, erreurs de raisonnement ; erreurs de mathématiciens, parfois célèbres) ; erreurs dans les sciences expérimentales (erreurs d'observation, erreurs de mesure, erreurs d'interprétation – ces dernières sont assez fréquentes dans les sciences de la vie) ; erreurs dans les sciences morales (l'erreur n'y est pas éloignée du mensonge). Cependant l'exercice de classification ne donne pas accès par lui-même aux causes d'erreur.

Le point de vue d'un biologiste

Le 21 juin 2011, lors de la séance solennelle de l'Académie des sciences consacrée à la réception des nouveaux membres sous la Coupole de l'Institut de France, le secrétaire perpétuel Jean-François Bach a prononcé un discours consacré à l'erreur scientifique. Ses analyses vont nous permettre de préciser certains points. En introduction, Bach cite Einstein : « *Qui n'a jamais commis d'erreurs n'a jamais tenté d'innover* », et Ernst Jünger : « *Une erreur ne devient une faute que lorsqu'on ne veut pas en démordre.* »

Cette dernière attitude est particulièrement illustrée par le cas de Lyssenko, analysé par Bach. L'expérience de ce chercheur en immunologie l'amène au diagnostic suivant : « *L'erreur représente la préoccupation de tous les chercheurs, ce qui les amène à répéter les expériences de nombreuses fois, à chercher des confirmations d'une observation par toutes les voies possibles, et à critiquer leurs travaux autant que ceux de leurs collègues. [...] La complication vient du fait que l'erreur peut se présenter sous de multiples formes souvent sournoises.* »

Bach distingue d'abord l'erreur expérimentale avec ses diverses formes : l'erreur de manipulation, bien connue des novices ; l'absence de prise en compte de variations individuelles entre expériences, ce qui peut aussi relever d'une erreur par ignorance, mais qui peut être contrôlée par l'analyse statistique ; l'erreur due à l'introduction

subreptice d'un facteur extérieur, telle une contamination.

En second lieu se présente l'erreur d'interprétation, si fréquente dans les sciences expérimentales. En effet, le risque d'erreur « *est encore plus grand au moment de l'interprétation des expériences. On n'est jamais sûr d'avoir fait tous les contrôles nécessaires. On n'est jamais à l'abri d'une explication totalement différente de celle qu'on a proposée. La difficulté principale est d'apporter la démonstration de la conclusion formulée à partir des données expérimentales. Trop souvent, les chercheurs émettent ou se réfèrent à une théorie, puis se contentent de réaliser des expériences dont la compatibilité avec la théorie viendra les satisfaire sans pour autant démontrer la théorie.* »

Plus dangereuse est l'erreur par ignorance. « *Les erreurs d'interprétation sont souvent dues à l'ignorance. Cette ignorance est coupable lorsqu'elle concerne des faits connus voire établis désormais aisés à retrouver dans les bases de données informatiques. Le problème est particulièrement fréquent dans le grand public* » (Bach, 2011). L'irrationalité y domine, comme dans le cas de l'homéopathie.

Sous quel angle considérer le cas de Lyssenko ? Il ne s'agit plus de science, mais de pseudo-science, donnant à l'environnement un pouvoir tout puissant sur la constitution des organismes végétaux pouvant être ainsi transformés d'une espèce en une autre. Cette absurdité relève d'une « *intrication extraordinaire de l'erreur scientifique, de la conviction irrationnelle, de la fraude et de la politique* ».

Il est important de souligner tout ce qui sépare les spéculations de Lyssenko du concept actuel d'épigénétique. Ce concept « *selon lequel l'environnement au sens large peut modifier l'expression des gènes et cela de façon apparemment transmissible aux descendants, au moins pour quelques générations, n'a en rien remis en question le dogme de la transmission mendélienne des gènes avec leurs séquences nucléotidiques originales, même dans le cas des paramutations où, pourtant, l'expression d'un gène peut être sélectivement inhibée de façon*

durable et transmissible ». Le cas de Lyssenko relève d'un mélange de fraude caractérisée et de complète négligence des normes méthodologiques élémentaires de la connaissance scientifique.

Jean-François Bach s'est attaché à dénoncer la fraude scientifique caractérisée. *« Sujet difficile car il n'est pas toujours aisé de détecter la fraude, d'autant plus que celle-ci est souvent, mais pas toujours, issue de recherches au départ tout à fait honnêtes. Le chercheur fait une observation inattendue qu'il publie, puis qu'il n'arrive pas à confirmer. Plutôt que de se rétracter, comme il en a le devoir, il s'engage dans une fuite en avant où il va falsifier des résultats pour confirmer ses dires. »*

De tels cas sont aussi rares que parfois spectaculaires, telle la « mémoire de l'eau », laquelle *« récapitule en quelque sorte tous les facteurs d'erreur qui viennent d'être évoqués »*. *« En bref, une histoire à la fois triste et surréaliste qui relevait très probablement beaucoup plus de l'erreur par conviction que de la fraude. »* Bach souligne en conclusion que l'erreur reste relativement rare et la fraude exceptionnelle, et que la communauté scientifique est beaucoup plus rigoureuse que d'autres.

Retour sur Lyssenko : un point de vue épistémologique

Le cas de Lyssenko (Figure 1) est resté tristement célèbre, en général pour son influence catastrophique sur l'agriculture soviétique, et d'abord pour ses prétentions à faire de la technique bien connue de vernalisation une technique de transformation d'une variété de plante cultivée en une autre : par l'entretien de conditions d'humidité et de température favorables pendant l'hiver, des blés d'hiver plus productifs seraient convertis en blés à semer au printemps, ce qui permettrait d'augmenter notablement le rendement des cultures. Ayant ainsi prétendu avoir transformé une variété de plante cultivée en une autre, Lyssenko a élargi cette idée fautive à une théorie de la transformation d'une espèce de plante cultivée en une autre par l'action du milieu.



Figure 1. Portrait de Trofim Lyssenko (1898-1976).

Comme l'explique Gallais à propos de variétés de blé : *« Par ce phénomène dit de vernalisation, un blé d'hiver est ainsi "transformé" en blé de printemps »* (Gallais, 2018). Le terme de « transformé » n'est pas innocent. La technique de vernalisation repose sur des mécanismes physiologiques d'adaptation aujourd'hui bien compris. Cependant, comme l'a fait remarquer Gallais (comm. pers.), Lyssenko n'a pas pu distinguer chez le blé d'hiver l'entrée de la graine en vie ralentie et le besoin en froid pour enclencher le développement reproductif. D'autres chercheurs, dont le spécialiste de la culture expérimentale P. N. Konstantinov, ont essayé de reproduire les résultats de Lyssenko, sans guère de succès, l'augmentation des rendements n'étant pas significative. Cela laisse planer le soupçon de fraude (parfois avérée) sur les résultats de Lyssenko.

La pratique de Lyssenko est caractérisée par une grande négligence vis-à-vis des règles épistémologiques élémentaires de la recherche. En premier lieu, l'ignorance totale de la littérature

Note de recherche

internationale sur le sujet. En deuxième lieu, le petit nombre d'expériences sur lesquelles Lyssenko fonde ses théories et la très petite échelle à laquelle il mène une expérience. En troisième lieu, la faible reproductibilité des résultats. En quatrième lieu, le rejet des résultats négatifs. En cinquième lieu, la tendance à invoquer des facteurs inconnus pour expliquer les anomalies relevées par ses contradicteurs (élasticité de la théorisation de Lyssenko, ou bien appel à des explications *ad hoc*). En sixième lieu, l'absence fréquente des expériences de contrôle ou leur mauvaise conception. Enfin le rejet des mathématiques et du formalisme en biologie, considérée comme une science qualitative.

En outre, la pureté des lignées utilisées par Lyssenko n'était nullement assurée ; elles étaient certainement très hétérogènes, ce qui ne permettait pas de raisonner correctement sur elles (Hudson et Richens, 1946, 33-35). Les publications de Lyssenko sont extrêmement assertoriques, et rapidement polémiques.

En 1925, en Azerbaïdjan, lorsqu'il étudiait le développement des plantes, Lyssenko élaborait une théorie du développement par phases, théorie selon laquelle les exigences des plantes vis-à-vis des conditions du milieu (température, lumière) ne sont pas identiques aux différentes phases du développement. En particulier, il y a un décalage dans la phase végétative selon les conditions environnementales. Il y a sans aucun doute du vrai dans cette dernière assertion.

Cependant la théorie des phases, dans le système de Lyssenko, est la base théorique de la vernalisation, du fait de la plasticité de l'organisme. Ce système est exposé en 1935 par Lyssenko et son âme damnée, le pseudo biologiste-philosophe-idéologue Isaak Israilevitch Present, membre du Parti communiste, qu'il avait rencontré à Odessa en 1930.

Dans les faits, cette théorie conduit à des constructions extrêmement complexes sur le rôle des facteurs limitants dans le développement et sur leur transmissibilité dans les croisements entre variétés. Des caractères comme la précocité ou la vigueur végétative doivent être sous l'influence de facteurs limitants comme la température ou

l'éclaircissement. Par facteurs limitants, il faut comprendre des facteurs qui jouent dans des conditions définies d'environnement, et non dans d'autres (Hudson et Richens, 1946, 16-17). Les conclusions de Lyssenko et Present ont été fortement critiquées.

En 1936, Konstantinov accusa les travailleurs de l'Institut d'Odessa de négliger les faits contraires découverts dans leur Institut ou dans d'autres. En effet, certains résultats obtenus à Odessa montraient que des hybrides F1 étaient plus tardifs que leurs parents plus précoces. Le cas fut mis en avant lorsque Maksimcuk révéla que Lyssenko s'était délibérément abstenu de faire allusion aux résultats obtenus à Odessa. Ce refus de mentionner le cas, à moins d'être forcé de le faire, créa une impression défavorable (Hudson et Richens, 1946).

Cela n'a nullement empêché Lyssenko d'appliquer sa théorie aux générations suivantes F2 et la suite, preuve de son entêtement. Les assertions de Lyssenko et Present sur F1 et F2 ont été également fortement critiquées. En premier lieu il existait de nombreux autres exemples d'hybrides F1 plus tardifs que le parent le plus précoce. En second lieu, la « ségrégation transgressive » de la précocité était bel et bien observée au cours des hybridations de blé, comme l'ont montré de nombreux généticiens, tels Anton M. Zebrak, G. K. Meister, P. N. Konstantinov, Nikolai Vavilov (Hudson et Richens, 1946). Des fraudes caractérisées dans la présentation très surestimée des résultats aux autorités, afin de leur plaire, eurent également lieu.

De nombreux généticiens russes émirent des critiques vigoureuses à l'égard des thèses de Lyssenko. Parmi eux, Nikolai Vavilov qui avait voyagé dans le monde et avait constitué une considérable collection génétique de semences, conservée à Saint-Petersbourg, pour laquelle il était internationalement reconnu. Vavilov était considéré comme un représentant de la « science bourgeoise ». Il mourut misérablement dans la prison de Saratov en 1943, victime des purges de Staline, mais fut réhabilité en 1955 (Medvedev, 1971). À l'opposé de Lyssenko,

Note de recherche

Vavilov peut être considéré comme un représentant de l'internationalisme scientifique. Dans l'Union soviétique des années 1930 et suivantes, l'antagonisme entre la génétique mendélo-morganienne, bientôt qualifiée de « science bourgeoise », et les théories sur l'influence prépondérante du milieu, vues comme la véritable « science prolétarienne », allait se développer sur fond de crise agricole et de croissante orthodoxie idéologique, même si les lyssenkistes n'ont jamais réussi à éliminer complètement les mendéliens, dont certains ont survécu.

Le résultat principal de l'influence du lyssenkisme sur l'agronomie soviétique, malgré les résistances des généticiens mendéliens, fut de stériliser la recherche et l'enseignement de la génétique classique en Union soviétique pendant de nombreuses années au profit du lyssenkisme, y compris après la mort de Staline, qui fut un soutien relativement constant de Lyssenko (mais pas totalement constant, et qui n'a pas toujours admis l'opposition entre la « science prolétarienne » et la « science bourgeoise »), et sous la direction de Nikita Khrouchtchev (avec des réserves concernant certains aspects du lyssenkisme). Des instituts de recherche furent réorientés, des programmes d'enseignement profondément modifiés. La situation ne put être progressivement rétablie que par l'ouverture de la recherche soviétique à la science occidentale à partir des années 1960 et au soutien des biologistes occidentaux. La France a joué un rôle important dans l'aide scientifique apportée à la biologie soviétique pour sa remise au niveau en génétique et biologie moléculaire.

Pour conclure

Comment concevoir les responsabilités respectives d'un chercheur d'abord relativement isolé et des structures bureaucratiques et centralisatrices de l'État soviétique dans la triste affaire Lyssenko ? L'ascension de Lyssenko, d'origine paysanne très modeste, jusqu'aux plus hautes charges, comme membre du Soviet

suprême de l'Union soviétique et membre du Præsidium de l'Académie des sciences, à partir du milieu des années 1930, est typique du système soviétique. Outre son origine, la détermination de Lyssenko, profitant de la crise agricole, à imposer par tous les moyens ses propres idées (ce qui est allé plus tard jusqu'à des propositions délirantes) est un facteur majeur de son ascension. Cette ascension a été permise en outre par la persistance dans la science russe de traditions relatives à l'influence du milieu, sur lesquelles Lyssenko pouvait aisément s'appuyer. Enfin les besoins criants de l'Union soviétique en matière d'alimentation et la faible culture scientifique de la plupart des élites dirigeantes soviétiques permettent vraisemblablement d'expliquer le crédit dont a pu jouer Lyssenko, ce porteur de fausses et mirifiques promesses.

Dans un article publié en première page du journal *Combat* (alors dirigé par Albert Camus) le 15 septembre 1948 sous le titre « La victoire de Lyssenko n'a aucun caractère scientifique », Jacques Monod réagit à la réunion de l'Académie Lénine des sciences agricoles en août 1948, qui avait consacré la victoire du camp de Lyssenko et l'approbation de son rapport sur la situation dans les sciences biologiques. Monod écrit : « *Ce qu'il s'agit de comprendre, c'est comment Lyssenko a pu acquérir assez d'influence et de pouvoir pour subjuguier ses collègues, conquérir l'appui de la radio et de la presse, l'approbation du Comité central et de Staline en personne, au point qu'aujourd'hui la "Vérité" dérisoire de Lyssenko est la vérité officielle, garantie par l'État, que tout ce qui s'en écarte est "irrévocablement banni" de la science soviétique et que les opposants qui contre lui défendaient la science, le progrès, les vrais intérêts de leur patrie sont honteusement chassés, cloués au pilori comme "esclaves de la pensée bourgeoise" et pratiquement accusés de trahison. Tout cela est insensé, démesuré, invraisemblable. C'est vrai pourtant.* »

Il n'y a rien à ajouter à ce diagnostic de Monod sur cette « grotesque et lamentable affaire », si ce n'est que de telles situations peuvent se reproduire, d'une autre façon et dans d'autres

Note de recherche

domaines, tant que les scientifiques ne veillent pas eux-mêmes à la nature de leurs relations aux États.

Le développement épistémologique donné ici est issu de parties d'un exposé donné à l'Académie des sciences le 30 avril 2024, lors de la séance sur les erreurs en sciences, sous le titre « Lyssenko, de l'erreur à la fraude : science, technique, idéologie », et d'un exposé plus complet donné sous le même titre à l'occasion de l'Assemblée générale de l'Association française pour les biotechnologies végétales le 14 mai 2024.

Références

- Bach JF. 2011. *L'Erreur scientifique*, Académie des sciences, Paris.
- Berg R. 1983. *On the History of Genetics in the Soviet Union: Science and Politics; the Insight of a Witness*, Final Report to National Council for Soviet and East European Research.
- Buican D. 1988. *Lyssenko et le lyssenkisme*, Presses universitaires de France, Paris.
- Canguilhem G. 1943-1944. *Manuscrit d'un cours sur l'erreur donné à la Faculté des lettres de l'université de Strasbourg repliée à Clermont-Ferrand en 1943-1944*, Centre d'archives en philosophie, histoire et édition des sciences à l'École normale supérieure de Paris ; dossier GC.11.3.1, « L'erreur », f°11.
- Chevalier A. 1950. Comparaison entre la génétique néo-mendélienne, la génétique soviétique ou lyssenkiste et l'œuvre de N. I. Vavilov, *Revue internationale de botanique appliquée et d'agriculture tropicale*, 30 (335-336), 462-467.
- Chauvet M. 2022. *Lyssenko et la suite*. In Debru C (dir) *Les Sciences en guerre froide (1946-1991). France – Union soviétique et pays de l'Est*, Presses universitaires Rhin et Danube, Huningue, 379-386.
- Debru C (dir). 2022. *Les Sciences en guerre froide (1946-1991). France – Union soviétique et pays de l'Est*, Presses universitaires Rhin et Danube, Huningue, 523 p.
- Dunn LC. 1946. Review, *The New Genetics in the Soviet Union* by P. S. Hudson and R. H. Richens. *Science*, New Series, 104 (2703), 377-378.
- Fascitiello I. 2022. *Andrej N. Kolmogorov in front of the "affaire Lyssenko": an episode in mathematics and ideology in the 20th century*, University of Roma Tre, Department of mathematics and physics.
- Gallais A. 2018. *Histoire de la génétique et de l'amélioration des plantes*, Éditions Quae, Versailles.
- Graham LR. 1992. *Science in Russia and in the Soviet Union, a Short History*, Cambridge University Press, New York, Melbourne.
- Graham LR. 1993. *The Ghost of Executed Engineers: Technology and the Fall of the Soviet Union*, Harvard University Press, Cambridge (Mass.), London.
- Hudson PS, Richens RH. 1946. *The New Genetics in the Soviet Union*, Imperial Bureau of Plant Breeding and Genetics, School of Agriculture, Cambridge (UK).
- Huxley J. 1949. *Heredity. East and West: Lyssenko and World Science*, Henry Schuman, New York.
- Joravsky D. 1970. *The Lyssenko Affair*, The University of Chicago Press, Chicago and London.
- Karcz JF (ed.). 1967. *Soviet and East European Agriculture*, Russian and East European Studies,

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

Note de recherche

University of California Press, Berkeley and Los Angeles.

Lecourt D. 1976. *Lyssenko. Histoire réelle d'une science prolétarienne* (préface de Louis Althusser), François Maspero, Paris.

Lyssenko T. 1951. *Heredity and its Variability*, Foreign Languages Publishing House, Moscou (Russie).

Lyssenko T. 1951. *Organismus und Umwelt*, Verlag Kultur und Fortschritt, Berlin (Allemagne).

Lyssenko T. 1953. *Agrobiologie. Génétique, Sélection et Production des Semences*, Éditions en langues étrangères, Moscou (Russie).

Mach E. 1917. *La Connaissance et l'Erreur* (trad. Marcel Dufour), Flammarion, Paris, 124.

Medvedev J. 1971. *Grandeur et chute de Lyssenko* (préface de Jacques Monod), Gallimard, Paris.

Soyfer V. 1994. *Lyssenko and the Tragedy of Soviet Science*, Rutgers University Press, New Brunswick (NJ).

Stark A, Seneto E. 2011. A.N. Kolmogorov defence of Mendelism, *Genetics Molecular Biology*, 34(2), 177-186.

Vavilov N. 1992. *Origin and Geography of Cultivated Plants*, Cambridge University Press, Cambridge.

Rubrique

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

Reçu

12 juin 2024

Accepté

21 septembre 2024

Publié

12 novembre 2024

Édité par

Nadine Vivier, professeur émérite d'histoire contemporaine à l'université du Maine, membre de l'Académie d'agriculture de France

Rapporteurs

1. Anonyme
2. Michel Morange, professeur de biologie à l'école normale supérieure.

Citation

Debru C, La science, de l'erreur à la fraude. Le cas de Lyssenko. Science, from error to fraud. The Lyssenko case. *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF)*, 18(4), 1-9. DOI: 10.58630/pubac.not.a335599.



Claude Debru est membre de l'Académie d'agriculture de France, professeur émérite de philosophie des sciences à l'École normale supérieure.



ACADÉMIE
d'AGRICULTURE
de FRANCE

AGRICULTURE ■ ALIMENTATION ■ ENVIRONNEMENT