Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France

Volume 12 (2021)

ACADÉMIE d'AGRICULTURE de FRANCE
AGRICULTURE ■ ALIMENTATION ■ ENVIRONNEMENT

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France

18, rue de Bellechasse 75007 Paris, France

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

https://www.academie-agriculture.fr

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Academic Notes of the French Academy of Agriculture

18, rue de Bellechasse 75007 Paris, France

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

https://www.academie-agriculture.fr

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Notes académiques de l'Académie d'Agriculture de France

Académie d'agriculture de France

Volume 12, 2021

https://doi.org/10.58630/pubac.not.v582827

- **Gilles Lemaire, Jean-François Briat, Michel Dron**. 2021. Quelle recherche agronomique pour une agriculture durable ? / What agronomic research for sustainable agriculture?, 12(1), 1-18, https://doi.org/10.58630/pubac.not.a560178

- **Marie-Claude Maurel**. 2021. La petite exploitation agricole dans l'espace rural européen. Retour sur une figure controversée, 12(2), -18, https://doi.org/10.58630/pubac.not.a686459

- **Hervé This.** 2021. Des cristaux d'Auguste Laurent et des techniques d'analyse optique de Jean-Baptiste Biot furent directement à l'origine de la découverte de la chiralité par Louis Pasteur / Crystals by Auguste Laurent and optical analysis techniques by Jean-Baptiste Biot were directly responsible for the discovery of chirality by Louis Pasteur, 12(3), 1-33, https://doi.org/10.58630/pubac.not.a894127

- **André Gallais, Yvette Dattée, Bernard Le Buanec, Yves Lespinasse**. 202I. JA propos de l'article *Quelle recherche agronomique pour une agriculture durable ? / About the article What agronomic research for sustainable agriculture?,* 12(4), 1-3, https://doi.org/10.58630/pubac.not.a493576

- **Gilles Lemaire, Jean-François Briat, Michel Dron. 2021.** Réponse des auteurs au commentaire de Gallais et al. / Answer to the commentary by Gallais et al. ,12(5), 1-3, https://doi.org/10.58630/pubac.not.a924010

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

Quelle recherche agronomique pour une agriculture durable ?
Which agronomic research for a sustainable agriculture?

Gilles Lemaire [1]*, Jean-François Briat [2], Michel Dron [3]

[1] 12, rue Virecourt, 79500, Melle, 06-70-81-80-08, gilles.lemaire.inra@gmail.com
[2] 116, rue de la Grange 34980, St Clément-de-Rivière, 06-51-46-94-51, jfbriat@free.fr
[3] 21, avenue Burre-Cottage, 91440, Bures-sur-Yvette, 06-46-75-85-75, michel.dron@u-psud.fr

* Auteur correspondant

Résumé
Après la Seconde Guerre mondiale, les organismes de recherche ont accompagné l'augmentation de la production agricole en promouvant l'utilisation d'intrants afin de corriger les facteurs limitant le potentiel de production des cultures. L'indéniable succès des efforts conduit aujourd'hui à s'interroger sur la durabilité des systèmes de production agricoles. Pour prendre en compte les objectifs d'environnement et de biodiversité, la recherche agronomique a abandonné certains de ses paradigmes fondateurs et acquis de nouvelles connaissances concernant les fonctions éco-systémiques. Toutefois, sans une activité de recherche-développement intégrant les acteurs et porteurs d'enjeux des systèmes de production agricoles, les « connaissances pour comprendre » resteront largement insuffisantes et peu aptes à répondre aux enjeux multifonctionnels actuels. Leur efficacité dépendra de mises en synergie avec des « connaissances pour agir » dans un ensemble transdisciplinaire consacré à l'ingénierie agri-environnementale.

Abstract
After the Second World War, research accompanied the urgent increase in agricultural production, thanks to the use of means of production enabling to suppress factors limiting the productivity of crops. However this success is currently questioning the sustainability of our agricultural production and food systems. For taking into account the goals of environment and biodiversity, research abandoned some of its founding paradigms and acquired new knowledge concerning the functioning of the ecosystems. Without a structured research and development activity, integrating actors and

stakeholders of agricultural and food production systems "knowledge for understanding" will be largely insufficient to answer to the multifunctional challenges that agriculture has to face. Their efficiency will depend upon a synergistic coupling with ''knowledge for action » within transdisciplinary research programs devoted to ''agri-environmental engineering''.

Mots clés
Recherche agronomique, interdisciplinarité, transdisciplinarité, ingénierie agro-environnementale, agro-écologie, agro-écosystème.

Keywords
Agronomic research, interdisciplinarity, transdisciplinarity, agri-environment, engineering, agroecology, agro-ecosystem.

Aborder la question de la durabilité actuelle et future de l'agriculture en France et dans le monde conduit inévitablement à s'interroger sur le rôle qu'a pu avoir la recherche agronomique sur l'évolution de cette agriculture et les responsabilités de cette recherche dans la genèse des problèmes environnementaux et socio-économiques auxquels la société doit faire face aujourd'hui.
Cette analyse rétrospective une fois réalisée, il s'agira d'identifier les points clés que la recherche doit aborder pour faire face aux problématiques que l'agriculture affronte actuellement, et d'analyser les modes d'organisation qu'elle devrait avoir pour être en mesure de le faire efficacement.

1. La réussite passée de la recherche agronomique porte en elle-même ses limites actuelles

La première révolution agricole en Europe, au XVIe siècle, a permis un doublement de la production alimentaire grâce à l'association étroite entre « agriculture » et « élevage », qui a été la base des systèmes de production agricole (Mazoyer et Roudart, 2002). La deuxième révolution agricole entamée en Europe et en Amérique du Nord, après la Seconde Guerre mondiale, a permis un triplement des rendements, grâce à la mécanisation, l'utilisation des engrais minéraux et l'usage des pesticides. Les objectifs d'augmentation massive des rendements et de réduction des coûts de production ont été atteints en moins de 50 ans grâce à un appui volontariste de la recherche agronomique. Un schéma linéaire issu des travaux pionniers de Justus von Liebig (Liebig, 1855) et de l'extrapolation de sa loi dite des « facteurs limitants » a servi de paradigme accompagnant cette intensification importante de la production. Cette loi consistait à supposer que le rendement d'une culture (Y), dans un milieu donné, est déterminé par :
(1) un potentiel (Y_{max}) dépendant essentiellement de la génétique et de variables non modifiables du milieu local (température, rayonnement, etc.) ;
(2) une série de facteurs limitants successifs (contraintes physiques du sol, éléments nutritifs, excès ou manque d'eau, maladies, ravageurs, etc.) qu'il convenait donc de supprimer grâce à des interventions techniques mobilisant les intrants correspondants (mécanisation et travail du sol, drainage, fertilisation, irrigation, pesticides, etc.).
La loi se résumait par l'équation suivante (Sinclair et Park, 1993) :

$$Y = Y_{max}\ min[\ f_1(H_2O),\ f_2(N),\ f_3(P),\ f_4(K),\ \ldots,\ f_i(X_i),\ \ldots,\ f_n(X_n)]$$

où les différentes fonctions f_i représentent les rendements relatifs (valeurs comprises entre 0 et 1) correspondant à la disponibilité de chacun des facteurs (1, 2, …, *i*, …*n*) pour la plante tels qu'ils sont modifiés par les actions

culturales mises en œuvre. Ainsi lorsque $f_j < f_i$ pour tout facteur *i*, le *j*-ième facteur est le facteur limitant du rendement.

Dans l'ensemble des pays du monde, la recherche agronomique, ayant pour objectif d'augmenter le rendement « potentiel » Y_{max} grâce à la génétique et l'amélioration des plantes, s'est structurée par espèces cultivées et, donc, par filières de production, en étudiant les réponses des cultures aux interventions culturales visant à réduire chacun des facteurs limitants successifs, de manière à minimiser l'écart entre Y et Y_{max}.

Ce paradigme initial a abouti à une compartimentation de la recherche facteur par facteur, créant des spécialisations disciplinaires souvent étanches au sein de l'agronomie. Cette approche analytique de la réponse du rendement à chaque facteur considéré isolément s'est révélée très efficace, aboutissant à un triplement des rendements en une cinquantaine d'années. Elle a abouti à une importante production de connaissances nouvelles concernant les phénomènes physico-chimiques et biologiques élémentaires (attestée par l'augmentation du nombre de publications scientifiques « primaires » durant cette période), qui ont permis d'optimiser ou de maximiser chaque fonction élémentaire f_i pour chacun des facteurs de production grâce aux intrants mis en œuvre (fertilisants, irrigation, pesticides, etc.), en fonction d'un seul et même objectif : la réduction des facteurs limitants et l'augmentation de Y_{max}. Cependant cette efficacité indéniable de l'approche analytique a eu l'inconvénient majeur d'ignorer la nature interactive et systémique des effets des différents facteurs de production :

(1) les fonctions de réponse f_i ne sont pas indépendantes ;

(2) ces fonctions dépendent elles-mêmes des progrès réalisés sur Y_{max}.

Ainsi, progressivement, la recherche agronomique a découvert une réalité beaucoup plus complexe en s'appuyant peu ou prou sur les principes de l'écologie fonctionnelle :

(1) la co-limitation du rendement des cultures par plusieurs facteurs de production est la règle (Kho, 2000 ; Bloom *et al.*, 1985) : les plantes ne s'adaptent pas à un seul facteur limitant à la fois, mais bien à des combinaisons variées et variables de facteurs limitants qui interfèrent ;

(2) la réponse des plantes et des cultures aux facteurs du milieu doit s'étudier en séparant les processus déterminant la disponibilité des ressources dans le milieu et la capacité des plantes à les acquérir d'une part, et la capacité des plantes à les convertir en rendement d'autre part selon l'approche initiée par Monteith (1994) ;

(3) la disponibilité de chaque ressource du milieu pour les plantes est en grande partie dépendante du niveau de disponibilité des autres ressources (Duncan *et al.*, 2018) ; les études de type « courbes de réponse » facteur par facteur s'avèrent donc peu génériques et sont de ce fait de faible utilité ;

(4) les plantes interviennent elles-mêmes directement dans la modification de leur propre milieu et dans la disponibilité des ressources auxquels elles ont accès (Briat *et al.*, 2020) ; ainsi les relations de type « action-réponse » ne sont plus univoques, car les effets produits rétro-agissent sur les causes qui les ont induits.

Ces quatre principes relèvent du fonctionnement de toute plante dans son milieu naturel, indépendamment du fait qu'elle soit cultivée ou non. Ils s'imposent donc, aussi, pour l'étude du fonctionnement des parcelles agricoles, qui, avant d'être considérées comme des entités soumises et répondant à des interventions culturales (agro-systèmes), doivent être analysées comme une composante d'un écosystème (agro-écosystème) au sein duquel des organismes vivants interfèrent entre eux, répondent aux variations du milieu tout en le modifiant pour s'y adapter.

Toutes ces évidences, aujourd'hui admises

et documentées (voir références ci-dessus), rendent rétrospectivement l'approche linéaire d'un « progrès génétique » Y_{max} moteur du « progrès agricole » (consistant à gommer les facteurs limitants successifs par des actions appropriées correctives sur le milieu) contraire à une vision intégrative et systémique du fonctionnement des populations et communautés végétales. On ne peut certes pas nier la réussite historique de cette approche analytique et linéaire dans l'ensemble des pays du monde, qui s'est traduite par une augmentation de la production alimentaire pour répondre aux besoins d'une population humaine en forte croissance. Toutefois il est important d'en montrer non seulement les limites actuellement atteintes attestées par la stagnation de Y_{max} pour les principales espèces cultivées (Schauberger *et al.*, 2018), mais aussi les effets collatéraux « non prévus et non voulus », qui se traduisent aujourd'hui par des problèmes environnementaux majeurs auxquels se heurte l'agriculture.

2. Quelles leçons tirer et quelles recherches mettre en œuvre ?

Il ne s'agit pas ici de remettre en cause le formidable corpus de connaissances élémentaires que l'approche analytique et linéaire a permis de produire, mais de montrer en quoi ces connaissances, bien qu'indispensables, restent largement insuffisantes pour analyser la durabilité des systèmes agricoles si elles ne sont pas réassemblées et mises en perspective dans une approche résolument systémique, c'est-à-dire l'étude itérative et intégrative des systèmes biologiques en réponse à des perturbations (Aufray *et al.*, 2003). Les processus élémentaires physico-chimiques et biologiques qui sont à la base du fonctionnement des systèmes vivants, qu'ils soient « naturels » ou « pilotés par l'Homme », sont peu ou prou les mêmes, et ils doivent être repérés, identifiés, analysés et quantifiés en tant que tels, indépendamment du cadre étroit de la mise en œuvre des seules interventions agricoles. Cela a été fait de manière efficace par la recherche agronomique internationale, grâce à une segmentation de plus en plus poussée des disciplines scientifiques auxquelles elle a eu recours, et à l'analyse « aux variables séparées » fondée sur des plans expérimentaux factoriels avec l'aide des outils statistiques qui permettent d'établir des relations causales et non plus seulement corrélatives entre les facteurs et les variables. Toutefois la hiérarchisation de ces processus, l'analyse de leur interdépendance et de leur importance fonctionnelle relative, nécessitent une expression des « propriétés émergentes » (Salt, 1979 ; Lidicker Jr, 2008 ; Lobo, 2008 ; Le Moigne, 1990) que l'ensemble de ces processus élémentaires en interaction confèrent aux systèmes complexes que sont les systèmes agricoles. Ainsi les règles d'allocation des ressources entre les plantes individuelles au sein des peuplements végétaux et entre les organes d'une même plante, telles qu'elles peuvent être traduites par des relations d'allométrie, sont considérées comme des propriétés émergentes permettant d'exprimer la plasticité et la capacité d'adaptation des végétaux (Weiner, 2003). Les systèmes vivants dits « naturels » (écosystèmes) sont ainsi caractérisés par des propriétés dynamiques d'auto-évolution et d'auto-adaptation (Angeler *et al.*, 2019, Briat *et al.*, 2020). Ces mêmes propriétés s'appliquent également aux systèmes pilotés par l'homme (agrosystèmes), mettant en jeu des boucles de rétro-actions qui permettent aux organismes vivants, non seulement de réagir aux modifications du milieu en s'y adaptant (« réponse à… »), mais aussi de modifier leur propre milieu (« effet sur… ») (Briat *et al.*, 2020).

Dans un tel cadre, l'approche linéaire initiale de la recherche agronomique, cherchant à

relier directement « action de l'agriculteur » et « modifications de différents facteurs du milieu » aux « réponses des cultures en termes de rendement », ne pouvait pas satisfaire des exigences plus lointaines et diversifiées de durabilité qui sont celles d'aujourd'hui, même si elle permettait de répondre à l'urgence de l'objectif d'augmentation de la production.

Cette prise de conscience par la recherche agronomique de la nature « systémique » des agro-systèmes s'est faite progres-sivement, au fur et à mesure de l'avancement des connaissances grâce à une « inter-disciplinarité » croissante avec les sciences de la nature : écologie fonctionnelle, éco-physiologie, biologie du sol, biogéochimie, génétique évolutive, etc. Le concept d'agro-écosystème a ainsi émergé, permettant une convergence de concepts, méthodes et approches dans l'étude du continuum depuis les écosystèmes « naturels », qui étaient les seuls « dignes » d'intérêt de la part de l'écologie « académique », jusqu'aux écosystèmes « cultivés », en passant par les systèmes intermédiaires « prairies » et « forêts » à faible niveau d'anthropisation.

Ce rapprochement entre les sciences agronomiques et les sciences de la nature s'est accéléré en France, à partir des années 1990, grâce à la création d'unités mixtes INRA-CNRS-Universités et a correspondu à la volonté d'une plus grande intégration de la recherche agronomique dans les structures institutionnelles de la recherche scientifique. La recherche agronomique n'est plus alors considérée comme science d'application de type « ingénierie ». L'INRA à partir de cette époque (1980) devient un EPST (établissement public scientifique et technologique) et ne dépend plus seulement du ministère de l'Agriculture, mais aussi de celui de la Recherche scientifique.

Ce changement a été accompagné par le transfert aux filières agricoles professionnelles de la partie recherche-développement correspondant à l'ingénierie agronomique par la création des instituts techniques. Ceux-ci, tant en France métropolitaine que dans les pays du Sud (anciens instituts coloniaux ayant donné naissance ensuite au CIRAD), se sont organisés, au moins initialement, selon le schéma linéaire décrit ci-dessus, même si, par la suite, des actions plus transversales et systémiques ont pu être engagées (voir ci-dessous). L'ensemble du dispositif de conseil auprès des agriculteurs a progressivement été assuré par les coopératives et les organismes prescripteurs, et les dispositifs de formation professionnelle confiés aux lycées agricoles. A partir de ce moment, la recherche agronomique produit des connaissances « à propos de… » ou « sur… » l'agriculture, en répondant à des questions du type « que se passe-t-il si… ? », mais non des connaissances « pour… » l'agriculture qui est restée elle-même encore préoccupée par la question « que faut-il faire pour atteindre le rendement objectif et minimiser les coûts de production dans chacune des filières constituées ? ».

L'émergence progressive des préoccupations environnementales, incluant l'érosion massive de la biodiversité, à partir des années 1980-90, suite notamment au rapport de Jacques Poly sur une « agriculture plus économe et plus autonome » (Poly, 1979) et le rapprochement de la recherche agronomique avec la sphère de l'écologie scientifique ont permis de faire progressivement entrer une vision « agro-systémique » dans les questions de recherche avec l'émergence progressive du concept d'agro-écologie (Altieri, 1999). Cependant l'éloignement de la recherche de sa partie « ingénierie », restée intimement liée au développement agricole par filières, n'a pas permis d'assurer les changements de paradigme nécessaires pour faire face à la logique puissante des blocages socio-techniques et politiques qui étaient alors à l'œuvre. En effet, la diversification

indispensable des systèmes de production agricole et d'alimentation permettant de répondre aux enjeux de la multifonctionalité de l'agriculture et de sa durabilité (Lemaire *et al.*, 2019) s'est trouvée en contradiction avec le paradigme des économies d'échelle impliquant la simplification et l'homogénéisation des modes de production pour répondre aux contraintes de marchés de plus en plus mondialisés (Meynard *et al.*, 2013 ; Magrini *et al.*, 2019 ; Ridier et Labarthe, 2019). Les chercheurs en agronomie, en collaboration avec ceux des sciences humaines, ont malgré tout essayé de maintenir ce lien entre une production de « connaissances pour comprendre » et une production de « connaissances pour agir ». Cependant le fossé s'est creusé entre ces deux ensembles de recherches. Si les concepts d'agro-écosystème et d'agro-écologie, d'approche systémique et multi-fonctionnelle, ont pu se développer dans le cercle de la recherche agronomique, ceux-ci n'ont pas diffusé dans le tissu du développement agricole, faute d'avoir été confrontés à la réalité des problèmes des agriculteurs dans la gestion de leur système. Produire des connaissances « pour agir » nécessite non seulement « d'avoir des connaissances sur » le système sur lequel on veut agir, mais aussi de « comprendre les logiques d'action » de ceux qui doivent agir sur le système. Qui plus est, la confusion entre l'écologie, discipline scientifique, et l'écologie politique, a jeté beaucoup de troubles.

La recherche agronomique, en s'associant aux sciences humaines, a bien engagé des tentatives dans ce sens (voir les actions des départements systèmes agraires et développement à l'INRAE et au CIRAD). Mais le fossé avec les structures dominantes du développement agricole était alors déjà trop large, et ces recherches n'ont réussi à toucher que les systèmes agricoles qui étaient restés à l'écart du mouvement productiviste général.

3. Quelques exemples illustrant la séparation progressive entre la recherche agronomique et le développement agricole

3.1. La fertilisation des cultures

L'augmentation d'un facteur 3 des rendements des principales cultures entre les années 1950 et 2000 a été accompagnée d'une augmentation d'un facteur 7 de l'utilisation des engrais N et P (Tilman, 2002). L'approche linéaire entre « apport d'engrais – disponibilité des éléments dans le sol – réponse de la culture », grâce à l'expérimentation au champ et aux outils statistiques, a contribué à développer une pratique de sur-fertilisation généralisée du seul fait de l'incertitude pesant sur la détermination des doses d'apport optimales et l'aversion des agriculteurs au risque de ne pas atteindre le rendement objectif promis Y_{max} (Ravier *et al.*, 2016).

Ces sur-fertilisations généralisées ont engendré les pollutions constatées aujourd'hui (Meynard *et al.*, 2002). Une approche plus systémique de la dynamique de nutrition minérale des plantes, fondée sur une connaissance plus affinée des processus d'auto-régulation écosystémique « plante-sol-micro-organismes » a permis à la recherche de proposer un renversement de paradigme en remplaçant un « pronostic sol » très incertain, par une approche de « diagnostic *in situ* des plantes » permettant de mettre en œuvre un véritable pilotage des décisions en matière de fertilisation conduisant à une réduction importante des sur-fertilisations d'assurance et des pollutions qui en découlent (Briat *et al.*, 2020 ; Lemaire *et al.*, 2021). Cependant, le fossé entre l'acquisition de ces connaissances par la recherche (il y a plus de 30 ans déjà !) et leur traduction dans les pratiques de fertilisation des agriculteurs reste à l'heure actuelle béant. Plus grave, l'enseignement de ces nouveaux concepts,

Figure 1. Le découplage entre « filières céréalières » et « filières d'élevage » aboutissant à des spécialisations régionales, ne permet plus de créer la diversité locale des systèmes de production indispensables pour la maîtrise de la qualité de l'environnement et pour le maintien de la biodiversité (https://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturale/strategie-technique-culturale/article/un-bilan-global-tres-mediocre-mais-du-ble-de-qualite-pour-dijon-cereales-217-171007 .html et https://fr.wikipedia.org/wiki/Élevage_bovin_en_France).

outils et méthodes n'est même pas encore généralisé dans les lycées agricoles !

3.2. Le progrès génétique

La vision du progrès génétique comme moteur du développement de l'agriculture, que ce soit dans le domaine végétal ou dans le domaine animal, a amené à concentrer la recherche sur l'amélioration d'individus « élites » sur des critères de performance de rendement potentiel (Y_{max}), obligeant alors l'ensemble des autres disciplines, l'agronomie en particulier, mais aussi les disciplines liées à la santé des plantes, à corriger le milieu pour permettre l'expression du « potentiel génétique ». On a certes obtenu une augmentation importante de production, mais il est difficile d'en attribuer la cause à la seule augmentation du potentiel génétique ou à l'augmentation de l'usage des intrants.
Les recherches en écophysiologie ont montré que les efficacités de conversion des ressources mises en œuvre (efficience de la photosynthèse, efficience de l'azote, efficience de l'eau, etc.) n'avaient pratiquement pas été augmentées par la sélection. Seuls les indices de rendement (*harvest index*), définis comme le rapport entre la biomasse récoltée constitutive du rendement (grains, tubercules, etc.) et la biomasse totale de la plante, ont été augmentés.
Qui plus est, ce progrès génétique s'étant accompagné d'une augmentation concomitante de la disponibilité des ressources grâce aux apports d'intrants, la capacité des génotypes à prélever efficacement leurs ressources dans leur milieu n'a pas pu être sélectionnée. Ainsi la capacité d'espèces ou de génotypes à explorer des sols peu pourvus en eau ou en éléments minéraux pour en extraire leurs ressources et assurer un certain niveau de rendement n'a pas ou très peu été explorée, sans doute aussi du fait qu'il fallait alors y associer des phénotypes racinaires qu'il était difficile d'observer et de mesurer.
De la même manière, les espèces ou races animales capables de valoriser des ressources fourragères de médiocre qualité n'ont pas été réellement prises en compte par le progrès génétique tel qu'il a été mis en

œuvre dans le cadre des filières animales. Or il s'avère aujourd'hui que cette augmentation continue de Y_{max} atteint une asymptote et, peut être même pour certaines espèces, une décroissance liée au changement climatique (Schauberger *et al*., 2018). *A contrario,* les analyses d'écophysiologie montrent qu'il y a une variabilité génétique non ou insuffisamment exploitée, dans la capacité des espèces à tirer parti de leur milieu en conditions limitantes et à interagir sur celui-ci par l'intermédiaire du microbiome rhizosphérique pour augmenter la disponibilité des ressources du sol à leur profit (Fitzpatrick *et al.*, 2018 ; Briat *et al*., 2020).
L'exploitation de cette variabilité devrait être la base d'une augmentation de production sans augmentation d'intrants, même si la complexité d'une sélection végétale sur de tels critères peut paraître un frein *a priori*. Mais, là encore, de nouveau progrès dans les outils de génomique peuvent ouvrir des voies nouvelles. De la même manière, le paradigme de la génétique, qui était de réunir dans le même individu l'ensemble des allèles favorables et de constituer des peuplements les plus homogènes possibles pour favoriser l'expression de leur potentiel, atteint aujourd'hui ses limites, car il implique une fuite en avant dans l'artificialisation du milieu.
Il apparaît sans doute tout aussi intéressant non pas de rassembler les allèles favorables dans le même individu, mais de les insérer au sein de la même population de plantes alors composée d'individus génétiquement différents pouvant interagir et, éventuellement, coopérer pour exploiter au mieux les ressources limitées du milieu (Litrico et Violle, 2019), même si cette voie se révèle complexe à mettre en oeuvre. Il s'agit donc d'opérer un changement de paradigme, depuis celui dominé par la génétique quantitative à celui ouvert davantage sur la génétique des populations et des communautés. Un tel *aggiornamento* doit bien sûr s'opérer à tous les niveaux d'organisation, de la recherche scientifique jusque dans les filières des semences et du développement agricole. Or ce changement de paradigme, déjà largement engagé au niveau de la recherche, reste peu diffusé pratiquement en dehors de celle-ci, malgré quelques tentatives.

3.3. La santé des cultures

La maîtrise des maladies et ravageurs des cultures est un domaine qui illustre parfaitement le paradigme initial d'élimination des facteurs limitants permettant d'atteindre le potentiel génétique des espèces améliorées. Le recours aux molécules de synthèse, dans une approche purement préventive pour éviter tout risque de maladie ou d'attaque de prédateurs, s'est révélé le plus rapide et le plus simple à mettre en œuvre. La recherche agronomique s'est concentrée sur l'acquisition de connaissances de base en biologie et en écologie des pathogènes, ravageurs et adventices, laissant le domaine de la mise en œuvre des pratiques de protection des cultures par les agriculteurs sous le contrôle influent de l'industrie chimique. Seules des tentatives peu suivies de « protection intégrée » avaient vu le jour (Ferron, 1999).
De la même manière, les introductions de résistances génétiques dans les variétés n'ont pas toujours abouti faute d'avoir été insuffisamment comprises avant d'être mises en œuvre par le développement agricole (Rolland *et al*., 2003). Un changement de paradigme est nécessaire pour proposer une alternative à la protection préventive systématique consommatrice inéluctable de pesticides.
Ainsi, si l'on veut voir se mettre en place des pratiques de cultures mixtes, de couverts végétaux hétérogènes, ou de mélanges variétaux, ou, plus généralement, de diversification des assolements et rotations pour minimiser les attaques de maladies et de ravageurs et réduire le recours aux

pesticides, il est indispensable que la génétique de ces types de culture soit mieux prise en compte (Van den Bosch, 2014 ;Storkey *et al*., 2019).
Il convient également d'analyser les dynamiques imbriquées des pathogènes et des ravageurs avec celles des organismes auxiliaires qui servent à les réguler en fonction de la diversité spatio-temporelle à l'échelle territoriale. Pour cela, grâce aux connaissances en écologie des populations et des communautés et en écologie des paysages, il est possible de concevoir les actions par lesquelles l'agriculteur et les aménageurs des territoires peuvent structurer et organiser les systèmes agraires pour réduire leur vulnérabilité aux maladies et ravageurs et limiter le recours aux pesticides (Rush *et al.*, 2016). Seule une telle approche intégrative et systémique impliquant chercheurs, agriculteurs, aménageurs et prescripteurs est susceptible de faire baisser la pression parasitaire sur les cultures à un niveau suffisant pour engendrer une diminution importante d'usage des pesticides.

3.4. L'association agriculture-élevage

La compartimentation de la recherche agronomique entre secteur animal et secteur végétal, observée dans le monde entier, ne peut pas être considérée comme la cause de la séparation de l'agriculture et de l'élevage, mais a certainement contribué à accélérer la spécialisation de plus en plus nette de ces deux systèmes de production dont le rapprochement avait pourtant été à la base de la première révolution agricole. Rappelons que les rendements en céréales ont stagné à moins de 10 quintaux par hectare (qx/ha) en Europe, des Romains jusqu'au XVIIe siècle, et qu'ils sont passés rapidement à 20 qx/ha après l'adoption de la rotation de Norfolk, en Angleterre, introduisant des prairies pâturées à base de trèfle blanc dans les rotations céréalières (Mazoyer et Roudart, 2002). La logique du développement des filières de production et la contrainte des économies d'échelle ont imposé une séparation territoriale des productions animales, qui sont devenues « hors-sol », avec les productions céréalières qui ont évolué vers la mono-culture (Lemaire *et al*., 2014). De ce fait, la recherche agronomique a négligé pendant longtemps l'analyse du rôle des herbivores et des ressources fourragères qui les alimentent (prairies, cultures fourragères) comme composante fonctionnelle des agro-systèmes : recyclage des nutriments azote (N), phosphore (P), potassium (K), etc., couplage des cycles carbone, azote, phospore (C, N, P)…, diversification des rotations et assolements, dynamique des matières organiques des sols, contrôle des maladies, parasites et adventices (Franzluebers et Gastal, 2019).
Les systèmes de polyculture-élevage n'ont plus été considérés comme « dignes d'intérêt » par le développement agricole cherchant à optimiser des filières animales ou végétales séparément grâce à une spécialisation de territoires entiers et même de régions entières. Même si certaines voix dans la recherche agronomique ont alerté sur les dangers de cette séparation entre système animal et système végétal (Ruselle *et al.*, 2007), cette tendance lourde portée par des leviers et des blocages puissants continue à structurer l'agriculture au niveau mondial.

4. Quelle organisation de la recherche pour répondre aux enjeux ?

L'analyse et les exemples présentés ci-dessus montrent que la recherche agronomique, en se concentrant de plus en plus sur une recherche de connaissances pour comprendre, et en compartimentant son approche dans des disciplines de plus en plus spécialisées, a effectivement contribué à mettre en évidence un grand nombre de

processus élémentaires qui sont à la base du fonctionnement écosystémique des plantes et des peuplements cultivés. Il est indéniable que ces connaissances sont aujourd'hui indispensables pour concevoir et bâtir ce que l'on nomme agro-écologie.

Mais ces connaissances, même fort utiles et indispensables, sont loin d'être suffisantes en elles-mêmes pour aider les agriculteurs dans les décisions de gestion de leurs systèmes de production (Sébillotte et Soler, 1990). Elles doivent être étroitement interfacées et intégrées avec les connaissances pour agir qui permettent de passer de l'espace des problèmes (que se passe-t-il si… ?) à celui des solutions (que faut-il faire pour… ?). Or en se consacrant essentiellement au premier, la recherche agronomique a négligé le deuxième… et a abandonné une grande partie de l'ingénierie agronomique aux acteurs, eux-mêmes, soumis aux contraintes socio-économiques des marchés…

Il ne s'agit pas de revenir en arrière. Une ingénierie agronomique non alimentée et non étayée par les connaissances nécessaires sur les processus qui sont à la base du fonctionnement des agro-écosystèmes serait vouée à une approche purement empirique « essais-erreurs » assez fastidieuse et peu efficace. Il est donc vain d'opposer recherche analytique et recherche systémique. Les recherches de ces deux types sont l'une et l'autre indispensables. Il s'agit de les imbriquer l'une avec l'autre. Pour cela, l'ingénierie doit être considérée, non pas comme une simple application technique, que l'on « externalise » ou que l'on « sous-traite », mais comme une composante indispensable de la science (Sébillotte, 1994).

Ainsi, si une partie de la recherche agronomique peut encore être structurée en fonction de disciplines scientifiques de plus en plus spécialisées pour faire avancer un « front de connaissances nouvelles », elle doit aussi être structurée, et de manière tout aussi puissante, en fonction de problématiques transdisciplinaires qu'il convient d'aborder dans toutes leurs dimensions.

En effet, la pluridisciplinarité qui a longtemps caractérisé la recherche agronomique, c'est-à-dire la mobilisation ou la production de connaissances nouvelles grâce à un partage des tâches et des compétences avec des disciplines fondées sur la compréhension des processus élémentaires, ne suffit plus pour aborder la complexité des problèmes auxquels l'agriculture doit faire face. Aucun des problèmes suivants ne peut être abordé, ni même posé, et encore moins étudié, à l'échelle d'une seule et même discipline scientifique :

(1) contribution et adaptation de l'agriculture au changement climatique,

(2) gestion quantitative et qualitative des ressources en eau,

(3) impacts sur la biodiversité,

(4) alimentation humaine et santé des populations.

Il ne s'agit donc plus ici d'additionner des compétences ou des méthodes d'approches, mais de contribuer à établir et documenter la nature complexe des problèmes grâce à un partage de points de vue liés à des expertises scientifiques différentes issues de disciplines scientifiques mises en synergie. C'est la définition même de la transdisciplinarité : les différentes disciplines scientifiques doivent partager une analyse commune du problème posé… non seulement entre elles, mais aussi et surtout avec les parties prenantes qui auront à mettre en œuvre les solutions qui pourraient être proposées. Ainsi la transdisciplinarité implique une ré-intégration pleine et entière de la partie ingénierie agro-environnementale qui avait été séparée de la recherche agronomique.

L'agronomie des paysages et des territoires est une belle illustration de cette nécessaire intégration. Les interventions culturales mises en œuvre par les agriculteurs à l'échelle de la parcelle agricole doivent prendre en compte des contraintes qui se manifestent à des échelles d'organisation

supérieures : l'exploitation, le territoire local, les filières d'amont et d'aval, le paysage, la région, etc.

L'importance de plus en plus grande des fonctions environnementales de l'agriculture a conduit la recherche agronomique à prendre en compte des entités spatio-temporelles beaucoup plus vastes que la parcelle agricole ou l'exploitation et le cycle annuel des productions, imposant des collaborations avec des disciplines telles que l'écologie, l'hydrologie, la climatologie, la bio-géochimie… Des connaissances ont ainsi pu être produites sur les conséquences de certaines pratiques agricoles mises en œuvre par les agriculteurs en termes d'impacts possibles ou probables sur les milieux, en réponse à des questions de type « Que se passe-t-il si… ? ». Mais ces connaissances, aussi pertinentes soient-elles, restent totalement incapables de fournir la réponse à la question « Que faut-il alors faire pour… ? », car les acteurs susceptibles de mettre en œuvre ces actions ne sont même pas identifiés, ni même aujourd'hui identifiables. La réponse à ce deuxième type de question correspond à une approche de type « ingénierie agro-écologique ». Elle implique donc la participation active des acteurs dans l'identification des solutions. Ce type de recherche s'est développé particulièrement en France avec la création du département SAD (Systèmes agraires et développement) à l'INRA et du département Systèmes agraires au CIRAD. Cette approche a même été reconnue comme une spécificité française au niveau international (Fresco, 1984).

Cependant Albaladejo et Casabianca (1997) estiment que, malgré les intentions, ces recherches restent essentiellement fondées sur une conception linéaire et descendante des processus d'innovation. Le rapport Sebillotte (1993) « Avenir de l'agriculture et futur de l'Inra », d'où ont découlé les programmes de recherche partenariale « Pour et Sur le Développement Régional » (PSDR), avait bien identifié la nécessité d'une approche systémique transdisciplinaire. Cependant, même si des projets de recherche intégrant les acteurs du développement agricole régional ont pu être mis en œuvre, ceux-ci sont restés relativement « marginaux » par rapport aux efforts consentis par ailleurs dans les disciplines de la biologie fondamentale. En effet, le rôle de la recherche n'est pas à elle seule de définir « la, ou les, solution(s) » devant et pouvant être mise(s) en œuvre. Elle ne peut que contribuer à analyser le problème posé dans toute sa complexité et toutes ses dimensions, et proposer des champs de solutions possibles (Sébillotte, 2003). Mais les solutions réelles et concrètes ne peuvent être que co-construites avec la participation directe des acteurs, en fonction des conditions concrètes locales qui sont les leurs, et sous l'égide des modèles génériques proposés par la recherche. Or les entités spatio-temporelles pertinentes pour mettre en œuvre de telles actions dans le cadre d'une approche multifonctionnelle de l'agriculture, incluant aussi bien la fourniture de services écosystémiques que celle de produits alimentaires, ne sont pas seulement restreintes aux parcelles et exploitations agricoles réellement gérées par les agriculteurs.

Le développement agricole détermine ses territoires d'action en fonction des logiques de filières d'amont (agro-fourniture) et d'aval (agro-industries et marchés) qui ne correspondent pas forcément aux problématiques environnementales qui ne peuvent se poser et se résoudre qu'au niveau d'entités spatiales totalement différentes (bassins versants, paysages, etc.) pour lesquels les acteurs et parties prenantes sont difficiles à identifier.

Il y a donc là encore un fossé qui s'est creusé entre la recherche agronomique qui fournit des connaissances de plus en plus pertinentes et formalisées en matière d'agro-écologie à l'échelle des paysages et des territoires, et un monde agricole qui ne peut

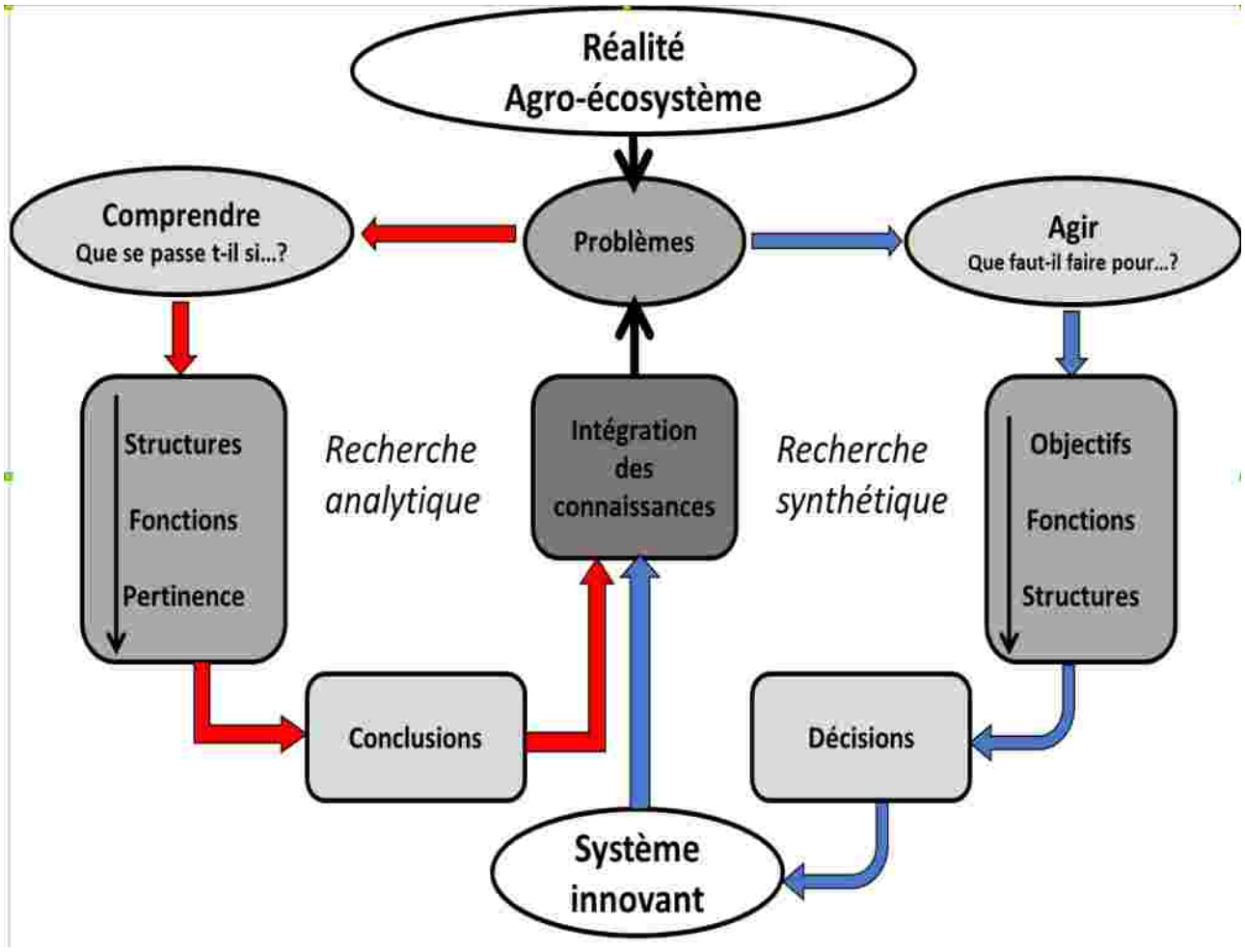


*Figure 2. Distinction schématique entre la recherche analytique « pour comprendre » (*analysis-oriented research*) et la recherche synthétique « pour agir » (*design-oriented research*) pour l'étude des agro-écosystèmes. Ces deux types de recherche doivent partir d'une analyse commune et partagée des problèmes à étudier / analyser. Dans le cas de la recherche analytique « pour comprendre », il s'agit de faire émerger des questions, puis d'analyser la « structure » du système, pour en révéler des « fonctions » et d'en déduire leur « pertinence » par rapport à la question posée. Dans le cas de la recherche synthétique « pour agir », l'approche est inverse : on part d'un « objectif », on identifie les «fonctions» permettant de l'atteindre et les «structures» du système sur lesquels ont peut agir pour en permettre l'expression. Ces deux approches sont nécessaires et s'enrichissent mutuellement en produisant ensemble de nouvelles connaissances permettant d'alimenter des boucles itératives de progrès qui aboutissent aux « innovations » (adapté de Rossing* et al.*, 2017).*

intégrer ces connaissances dans ses pratiques faute d'en recevoir une traduction opérationnelle activable par eux, ou à cause du refus d'une remise en cause d'une logique de développement considérée comme inéluctable. Le hiatus qui s'est

instauré entre « recherche pour comprendre » et « recherche pour agir » s'est d'autant plus approfondi au niveau mondial que les modalités d'évaluation des chercheurs et des institutions de recherche s'est aligné partout sur la devise « *publish or perish* » (Fanelli, 2010) qui a abouti à une inflation quantitative d'articles scientifiques monodisciplinaires au détriment d'articles de synthèse résultant d'approches plus systémiques et transdisciplinaires. Un exemple de structure transdisciplinaire qui pourrait être transposé à « ingénierie agro-environnementale » nous est donné par le GIEC (Groupement international pour l'étude du climat) au niveau international, qui est organisé comme un consortium au sein duquel chacune des disciplines scientifiques vient apporter son point de vue sur la nature complexe des problèmes à comprendre et à résoudre, avant de commencer à vouloir développer ses propres recherches et proposer ses propres solutions.

Chacun des problèmes urgents évoqués ci-dessus engage des connaissances produites par des disciplines de natures très différentes, des sciences de la nature jusqu'aux sciences de l'humain et de la société, qu'il s'agit d'organiser, de hiérarchiser et d'interfacer dans un cadre conceptuel commun si l'on veut pouvoir faire émerger des espaces de solutions qui aient une chance d'être de véritables contributions à la résolution du problème posé.

Or, ce cadre conceptuel est à bâtir, il n'est jamais donné *a priori*, et ne peut pas s'auto-construire par la seule addition de connaissances scientifiques déjà acquises par chacune des disciplines concernées. Il est indispensable, pour passer de l'espace des problèmes à l'espace des solutions possibles, que les acteurs susceptibles d'activer ces solutions aux différents niveaux soient parties prenantes de cette transdisciplinarité. C'est en cela que la partie « ingénierie agro-environnementale » doit être partie intégrante des structures de la recherche agronomique. Il ne s'agit pas seulement de préparer ou de favoriser une « phase d'application » à des acquisitions de connaissances qui elles resteraient « scientifiques » ! Bien au contraire, c'est sur la base d'une approche d'ingénierie agro-environnementale que la hiérarchie des connaissances pourra s'établir, en identifiant les manques, les lacunes, les redondances, et les interfaces entre disciplines à développer.

La figure 2, adaptée de Goewie (1993) et de Tittonell *et al.* (2013), illustre comment les deux approches « pour comprendre » et « pour agir » doivent s'associer et s'organiser pour produire des ensembles de connaissances qui puissent à la fois :

- fournir les bases nécessaires permettant à partir d'une même problématique partagée d'élaborer les questions pertinentes pour la compréhension du fonctionnement des agro-écosystèmes,
- formuler des solutions susceptibles de répondre aux problèmes posés grâce à des actions visant à modifier leur structure interne et à orienter ainsi leurs fonctions.

Ces deux ensembles de recherche doivent produire leurs propres concepts, méthodes et outils. Mais ils doivent surtout s'interfacer et s'imbriquer en partageant de manière transdisciplinaire l'analyse des problèmes et la production de connaissances nouvelles qu'il convient de mobiliser pour aboutir à de véritables innovations.

Rossing *et al.* (2017) font état d'une analyse bibliographique à l'échelle mondiale ayant pour source le Web of Science, dans laquelle ils identifient trois grands domaines de recherche concernant les agro-éco-systèmes : *analysis-oriented, design-oriented and implementation-oriented*, traitant de la problématique *agriculture, food production and nature conservation*. Ces trois domaines représentaient respec-tivement 80 %, 9 % et 4 % de la littérature produite en 2014. Cela montre clairement le déséquilibre encore important au niveau mondial entre recherche « pour comprendre » et recherche « pour

agir » et proposer des solutions aboutissant à de réelles innovations.
Cette approche intégrative transdisciplinaire vise à intégrer structurellement, en les faisant communiquer entre eux, les chercheurs « pour comprendre », les ingénieurs « pour agir » et les acteurs et porteurs d'enjeux « pour décider » au sein d'une même plateforme d'échange et de partage des informations. Ce type de plateforme traitant des cas concrets d'études se développe aujourd'hui activement autour du concept de « living lab », notamment concernant des problématiques de développement régional impliquant production agricole, transformation des produits, distribution et consommation alimentaire, santé et environnement (Janin *et al.* 2013). Il convient cependant de bien évaluer l'efficience de ce type d'infrastructure qui doit éviter deux écueils majeurs :
(1) celui de se construire en réaction contre ou en opposition à l'approche analytique classique, alors qu'il s'agit de travailler avec ;
(2) celui de constituer une simple structure d'opportunité pour capter les financements visant le développement régional, sans avoir à s'astreindre à l'effort essentiel de faire interagir les deux aspects complémentaires de la recherche « comprendre » et « agir sur ».
C'est la raison pour laquelle Bronson *et al.* (2021) pensent qu'une réflexion méthodologique sur l'évaluation de ce type de structure de recherche est indispensable.
Dans le cadre de cette note, il ne s'agit pas de proposer ou d'imaginer la structuration exacte que devrait se donner la recherche agronomique dans son organisation, mais d'analyser les raisons et les conséquences de la coupure historique entre les structures chargées de la recherche et celles chargées du développement agricole.
C'est sur la base de cette analyse qu'un effort de restructuration, impliquant également un effort similaire avec les organismes assurant la formation technique des agriculteurs, devrait être entrepris. L'évolution de l'agriculture ne se fera pas à contre-courant d'un modèle économique mondial dont la logique est aussi puissante. Les connaissances de base pour engendrer l'agro-écologie sont déjà largement suffisantes au niveau de la recherche, mais sans un interfaçage avec le développement agricole, ces connaissances, quelle que soit leur pertinence ou leur qualité, resteront impuissantes à mettre en mouvement le monde agricole, sauf à convaincre et à entraîner ceux, très minoritaires, qui l'étaient déjà.

Références

Albaladejo C, Casabianca F. 1997. *Eléments pour un débat autour des pratiques de recherche-action,* In *La recherche-action: ambitions, pratiques, débats,* Document Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement, INRA, Versailles (France), 30, 127-149.

Altieri M. 1999. The ecological role of biodiversity in agrosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment,* 74, 19-31.

Angeler DA, Fried-Petersen H, Allen CR, Garmestani A, Twidwell D, Birgé HE, Chuang W, Donovan VM, Eason T, Roberts CP, Sundstrom SM, Wonkka CL. 2019. *Adaptive capacity in ecosystems*, *Advances in Ecoloy Research,* 60, 1-24.

Auffray C, Imbeaud S, Roux-Rouquié M, Leroy H. 2003. *From functional genomics to systems biology: concepts and practices, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Biologie),* 326, 879-892.

Bloom AJ, Chapin FS, Mooney HA. 1985. Resource limitations in plants – an economic analogy, *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics,* 16, 363-392.

Briat JF, Gojon A, Rouached H, Plassard C, Lemaire G. 2020. Reappraisal of the concept of nutrient availability for plants in soils at the light of the recent molecular physiology advances, *European Journal of Agronomy,* 16, 126068.

Bronson K, Devotka R, Nguyen V. 2021. Moving toward generalizability? A scoping review on measuring the impact of living labs, *Sustainability*, 13, 502.

Duncan EG, O'Sullivan CA, Roper MM, Biggs JS, Peoples MB. 2018. Influence of co-application of nitrogen with phosphorus, potassium and sulphur on the apparent efficiency of nitrogen fertiliser use, grain yield and protein content of wheat: review, *Field Crop Research,* 226, 56-65.

Fanelli D. 2010. Do pressures to publish increase scientists' bias? An empirical support from US states data, PLoS One, 5(4), e10271.

Ferron P. 1999. *Protection intégrée des cultures : évolution du concept et de son application, Cahiers Agricultures*, 8, 389-396.

Fitzpatrick CR, CopelandJ, Wang PW, Guttman DS, Kotanen PM, Johnson MTJ. 2018. Assembly and ecological function of the root microbiome across angiosperm plant species, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(6), E1157-E1165.

Franzluebers AJ, Gastal F. 2019. *Building agricultural resilience with conservation pasture-crop rotations*. In Lemaire G, de Facio Carvalho PC, Kronberg S, Recous S (eds), *Agrosystem diversity: reconciling contemporary agriculture and environment quality*, Academic Press, Elvevier, Oxford (UK), 109-122.

Fresco LO. 1984. *Comparing anglophone and francophone approaches to farming systems rechearch and extension*, Networking Paper 1, F.S.S.P. Institute of Food Agricultural Science, University of Florida, Gainsville, https://edepot.wur.nl/175855.

Goewie EA. 1997. *Designing methodologies for prototyping ecological production systems*. Course reader MSc. Ecological Agriculture (F800-204), Wageningen Agricultural University, Wageningen (NL).

Janin C, Pecqueur B, Besson R. 2013. *Les living-labs : définitions, enjeux, comparaisons et premiers retours d'expériences*. Rapport de Recherche PACTE, https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs - 01726215/document.

Kho RM. 2000. On crop production and the balance of available resources*, Applied Soil Ecology*, 80, 71-85.

Lemaire, G, Franzluebers A, Carvalho PC, Dedieu B. 2014. *Integrated crop-livestock systems: strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality, Agriculture, Ecosystems & Environment*, 190, 4-8.

Lemaire G, De Facio Carvalho PC, Kronberg S, Recous S. 2019. *Agro-ecosystem diversity: reconciling contemporary agriculture and environment quality*, Academic Press, Elsevier, Oxford (UK).

Lemaire G, Tang L, Bélanger G, Zhu Y, Jeuffroy MH. 2021. Forward new paradigms for crop mineral nutrition and fertilization towards sustainable agriculture, *European Journal of Agronomy,* 125 (6), 126248.

Lidicker Jr WZ. 2008. Levels of organization in biology: on the nature and nomenclature of ecology's fourth level, *Biological Review*, 83, 71-78.

Le Moigne JL. 1990. *La modélisation des*

systèmes complexes, Éditions Dunod-Bordas, Paris (France).

Litrico I, Violle C, 2015. Diversity in plant breeding : a new conceptual framework, *Trends in Plant Science,* 20, 604-613.

Lobo I. 2008. Biological complexity and integrative levels of organization, *Nature Education*, 1(1), 141.

Magrini M-B, Béfort N, Nieddu M. 2019. *Technological Lock-in and pathways for crop diversification in the bio-economy*. In Lemaire G, De Facio Carvalho PC, Kronberg S, Recous S (eds) *Agro-ecosystem diversity: reconciling contemporary agriculture and environmental quality,* Academic Press, Elsevier, Oxford (UK), 375-387.

Mazoyer M, Roudart L. 2002. *Histoire des agricultures. Du néolithique à la crise contemporaine.* Editions du Seuil, Paris.

Meynard J-M, Cerf M, Guichard L, Jeuffroy M-H, Makowski D. 2002. Which decision support tools for the environmental management of nitrogen?*, Agronomie*, 22, 817-829.

Meynard J-M, Messéan A, Charlier A, Charrier F, Fares M, Le Bail M, Magrini M-B, Savini I. 2013. *Crop diversification: obstacles and levers. Study of farms and supply chains, synopsis of the study carried out by INRA at the request of the Ministries in charge of agriculture and ecology*. INRA Éditions. https://www6.paris.inra.fr/depe/Media/Fichier/Etudes/Diversification-des-cultures-anglais.

Monteith JL, 1994. *Principles of resource capture by crop stands*. In Monteith JL, Scott, RK, Unsworth MH (eds) *Resource Capture by Crops*. Proceedings of Easter Schools in Agricultural Science, Nottingham University Press, Nottingham (UK), 1-15.

Poly J. 1979. *Pour une agriculture plus économe et plus autonome,* Chambre d'agriculture d'Aquitaine, 644 (suppl).

Ravier C, Jeuffroy M-H, Meynard J-M. 2016. Mismatch between a science-based decision tool and its use: the case of the balance sheet method for nitrogen fertilization in France, *NAJS-Wageningen Journal of Life Sciences,* 79, 31-40.

Ridier A, Labarthe P. 2019. *Agricultural policies and the reduction of uncertainties in promoting diversification of agricultural productions: insights from Europe*. In Lemaire G, de Facio Carvalho PC, Kronberg S, Recous S (eds) *Agro-ecosystem diversity: reconciling contemporary agriculture and environmental quality*. Academic Press, Elsevier, Oxford (UK), 361-374.

Rolland B, Bouchard Ch, Loyce Ch, Meynard J-M, Guyomard H, Lonne P, Doussinault G. 2003. Des itinéraires techniques à bas niveaux d'intrants pour des variétés rustiques de blé tendre : une alternative pour concilier économie et environnement, *Courrier de l'Environnement,* INRA, 49, 47-62.

Rossing WAH, Sabatier R, Teillard F, Groot JCJ, Tittonell P. 2017. *Rebalancing food production and nature conservation. The need for design-oriented research*. In Gordon IJ, Prins HHT, Squire GR (eds) *Food Production and Nature Conservation: conflicts and solutions,* Routledge-Taylor & Francis, London & New York, 261-280.

Rusch A, Chaplin-Kramer R, Gardiner MM, Havro V, Holland J, Landis D, Thies C, Tschamtke T, Weisser W, Winqvist C, Woltz M. 2016. Agricultural Landscape simplification reduces natural pest control: a quantitative synthesis, *Agriculture, Ecosystem & Environment,* 221, 198-204.

Russelle MP, Entz MH, Franzluebers AJ. 2007. Reconsidering integrated crop-livestock systems in North-America, *Agronomy Journal,* 99, 325-334.

Salt, GW. 1979. Letter to the editor: A comment on the use of the term "Emergent Properties", *The American Naturalist*, 113, 1, 145-161.

Schauberger B, Ben Ari T, Makowski D, Kato T, Kato H, Ciais P. 2018. Yield trends, variability and stagnation analysis of major crops in France over more than a century, *Scientific Report* 8, 16865.

Sébillotte M, Soler LG. 1990. *Les processus de décision des agriculteurs. I. acquis et questions vives,* In Brossier J *et al.* (eds) *Modélisation systémique et systèmes agraires.* Séminaire du Département de Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement, février 1989, Saint-Maximin, France. hal-02772965.

Sébillotte M.1993. *Avenir de l'agriculture et futur de l'INRA,* Rapport à M. le président de l'INRA, INRA, Paris (France), https://belinra.inrae.fr/index.php?lvl=notice_display&id=183018 .

Sébillotte M. 1994. *Recherches-système et action. Excursions interdisciplinaires.* In *Recherches-Système en Agriculture et Développement Rural,*, Symposium International, novembre 1994, Montpellier, France, 21-25.

Sebillotte M.2003. *Développement durable et autres développements : solutions miracles ou comportements durables ? Matières à (re)penser le développement durable et autres développements*, Edition INRA, 2-7380-1107-1. hal-02829866.

Sinclair TR, Park WI. 1993. Inadequacy of the Liebig limiting-factor paradigm for explaining varying crop yield, *Agronomy Journal,* 85, 742-746.

Storkey J, Bruce TBA, McMillan VE, Neve P. 2019. *The future of sustainable crop production relies on increased diversity of cropping systems and landscapes.* In Lemaire G, de Facio Carvalho PC, Kronbeg S, Recous S (eds) *Agrosystem diversity : reconciling contemporary agriculture and environment quality,* Academic Press, Elvevier, Oxford (UK), 199-209.

Tilman D, Cassman KG, Matson PA, Naylor R, Polasky S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices, *Nature,* 418(6898), 671–677.

Tittonell P. 2013. *Towards ecological intensification of word agriculture,* Inaugural address, Wageningen University, Wageningen. https://www.wageningenur.nl/upload_mm/8/3/e/8b4f46f7-4656-4f68-bb11-905534c6946c_Inaugural%20lecture%20Pablo%20Tittonell.pdf.

Van Den Bosch F, Paveley N, Van Den Berg F, Hobbelen P, Oliver R. 2014. *Mixture as a fungicide resistance management tactic, Phytopathology*, 104, 1264-1273.

von Liebig J. 1855. *Die Grundsätze der Agricultur-chemie : mit Rücksicht Auf Die in England Angestellten Untersuchungen (2nd ed),* Vieweg, Braunschweig (Allemagne).

Weiner J. 2003. Allocation, plasticity and allometry in plants, *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 6(4), 207-215.

Édité par
Nadine Vivier, professeur émérite des universités

de l'université du Maine (Histoire contemporaine), membre de l'Académie d'agriculture de France.

Rapporteurs
Bertrand Hervieu, sociologue, ancien directeur de recherche au CNRS, ancien président de l'INRA , membre de l'Académie d'agriculture de France.

Michel Candau est directeur honoraire de l'Ecole nationale supérieure agronomique de Toulouse, membre de l'Académie d'agriculture de France.

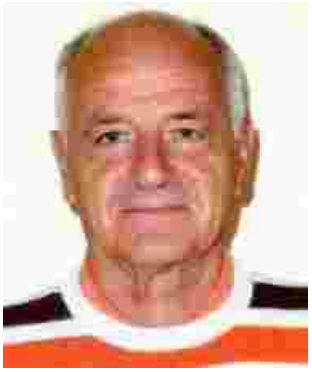
Rubrique
Cet article a été publié dans la rubrique «Points de vue» des *Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France.*

Reçu
25 juin 2021

Accepté
5 septembre 2021

Publié
16 septembre 2021

Citation
Lemaire G, Briat JF, Dron M. 2021. *Quelle recherche agronomique pour une agriculture durable ?, Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF),* 12(1), 1-18. https://doi.org/10.58630/pubac.not.a560178.



Gille Lemaire est directeur de recherche honoraire INRA. Il a conduit des recherches sur l'écologie des prairies, la fertilisation des cultures et l'association entre agriculture et élevage. Il est membre de l'Académie d'agriculture de France.

Jean-François Briat est directeur de recherche honoraire au CNRS. Il a conduit des recherches de physiologie moléculaire pour caractériser les mécanismes d'adaptation des plantes liés aux contraintes de leur nutrition minérale (carences ou excès). Il est membre de l'Académie d'agriculture de France.

Michel Dron est professeur émérite de biologie végétale de l'Université Paris-Saclay. Il est 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

La petite exploitation agricole dans l'espace rural européen. Retour sur une figure controversée

The small farm in the European countryside. A look back at a controversial figure

Marie-Claude Maurel [1]

[1] *Centre d'études des mondes russe, caucasien et centre européen, EHESS.*

Correspondance :
maurel@ehess.fr

Résumé
Un temps considérée comme en voie de disparition, la petite exploitation agricole regagne une légitimité par sa contribution à l'approvisionnement en produits frais via des circuits de proximité. Cette note tente de revisiter les approches conceptuelles et théoriques en positionnant la petite exploitation dans son histoire et son contexte. De nouvelles et récentes études typologiques témoignent de la grande diversité de cette forme sociale dans l'espace rural européen. L'attention portée aux réalités sociales du retour de la petite exploitation, à l'est de l'Europe, permet en décentrant le regard de faire place à d'autres éléments d'analyse que ceux généralement avancés.

Abstract
Once considered to be on the verge of extinction, small-scale farming is regaining legitimacy through its contribution to the supply of fresh food *via* proximity relations. This note attempts to revisit conceptual and theoretical approaches by positioning the small farm in its history and context. New and recent typological studies show the great diversity of this social form in the European countryside. The attention paid to the social realities of the coming back of small-scale farming in Central and Eastern Europe, by decentring the gaze, enables to introduce other elements of analysis than those generally put forward.

Mots clés
petite exploitation agricole, agriculture paysanne, agriculture familiale

Keywords
small-scale farming, peasant agriculture, family farming

Introduction

Un temps considérée comme une espèce en voie d'extinction, la petite exploitation agricole connaît une actualité renouvelée, portée par un discours aux accents militants. Le plaidoyer s'appuie sur l'urgence de la question environnementale pour avancer un certain nombre d'arguments : le salutaire recours à des pratiques agricoles écologiques exerçant des effets moins destructeurs sur les ressources, la défense d'un mode d'alimentation sain, le bien-fondé d'un approvisionnement de proximité pour des consommateurs soucieux du bien commun. L'argumentaire vient justifier le choix d'engager une transition agro-écologique vers un modèle durable en mesure d'assurer la sécurité alimentaire et nutritionnelle du plus grand nombre. Autour de ces idées-clés, un nouveau référentiel sociotechnique se met en place, formalisé par tout un courant de la science agronomique (Hubert et Couvet, 2020).

À la faveur de ce changement de paradigme, un discours démonstratif qui plaide la nécessité d'une rupture se déploie. Le panégyrique de projets néo-paysans portés par divers mouvements associatifs sous-tend une tentative de réhabilitation de la petite exploitation (Gaborieau, 2018). Parée de l'estampille écologique, la petite exploitation retrouve une nouvelle légitimité par la contribution qu'elle apporterait à l'approvisionnement en produits frais *via* des circuits courts et la perspective de transition qu'elle dessinerait face aux méfaits prétendus de l'industrialisation des chaînes agro-alimentaires. Ainsi innocentée des maux imputables aux grandes structures d'exploitation, une vision enchantée de la petite exploitation refait surface, à la faveur de ce basculement de paradigme.

Critiquée par la pensée marxiste en raison de son insuffisante productivité, de sa faible intensité capitalistique et de ses médiocres performances économiques, rejetée au nom d'une inaptitude à la modernisation agricole, la petite exploitation a longtemps pâti d'une absence de perspectives (Kautsky, 1900). Souvent désignée en lui accolant une épithète à connotation dépréciative, ou seulement catégorisée en termes de taille physique (la « petite propriété parcellaire ») ou de dimension économique, la petite production a mal supporté la comparaison avec sa forme antithétique, la grande production (Merlet, 2017). Dénigrée par les uns, mais louée par les autres, la figure controversée de la petite exploitation appelle une nouvelle mise en débat invitant à reconsidérer quelques-uns des travaux qui lui ont été consacrés, en particulier ceux qui soulignent la diversité, voire le polymorphisme, de cette forme sociale de production. Au-delà des traditionnels critères de caractérisation, il est pertinent de réinterroger le devenir de la petite exploitation en la positionnant dans son histoire et ses divers contextes géographiques.

Pour déjouer le piège de la définition, suffit-il de signaler les multiples façons de nommer la « petite exploitation », en répertoriant les qualificatifs porteurs de représentations symboliques qui s'y attachent ? Les épithètes « paysanne », « individuelle », « familiale », renvoient aux cadres théoriques traitant de l'économie paysanne ou, encore, de l'agriculture familiale. La mise en évidence de modes de fonctionnement distinctifs permettent-ils d'appuyer une catégorisation de cet objet ? La très grande diversité des petites exploitations dans l'espace européen est-elle réductible à un unique modèle ?

Ces interrogations qui concernent la perspective théorique que l'on adopte pour la qualifier sont formulées dans un premier temps de la démarche. Dans un second temps, l'analyse s'intéresse aux formes sociales revêtues par la petite exploitation à l'est de l'Europe, dans les États qui ont rejoint l'Union européenne, en 2004 et 2007. À la sortie d'un système collectiviste qui

avait strictement encadré la petite agriculture dans l'intention de l'éliminer, de nombreux ménages ruraux ont vécu son retour selon des modalités bien différentes de celles observées à l'ouest de l'Europe.
En décentrant le regard par une comparaison qui fait place à d'autres réalités sociales que celles qui sont généralement examinées, le présent « point de vue » propose d'élargir la mise en perspective historique de la petite exploitation afin de mieux discerner les potentialités, réelles ou rêvées, qu'on lui prête aujourd'hui.

La petite exploitation agricole, une catégorie statistique mal enregistrée

Pour la statistique de l'Union européenne, l'exploitation agricole est une entité d'ordre économique, « une unité technico-économique, soumise à une gestion unique et produisant des produits agricoles » (Eurostat, 2020). Cette définition lapidaire est accompagnée d'une mention expresse faite à la superficie de l'exploitation, c'est-à-dire à sa dimension physique. Pour caractériser les structures d'exploitation des États membres de l'Union européenne, on dispose, depuis 2005, des données statistiques recueillies par Eurostat, selon des méthodologies communes à l'ensemble des États membres. La détermination de classes statistiques permet d'opérer un dénombrement des unités de production agricole en fonction de la superficie agricole utilisée (SAU). L'estimation du nombre réel des petites exploitations agricoles est restreinte, du fait que les petites exploitations sont fréquemment omises des enregistrements officiels et des statistiques nationales. En outre, le recensement peut être biaisé en raison du relèvement du seuil des exploitations suivies par l'enquête *Farm Statistical Survey* (FSS) à 5 ha, 2 ha et 1 ha, respectivement par la République tchèque, la Slovaquie et la Pologne, réduisant d'autant la couverture de ces catégories depuis 2010. L'indicateur de taille physique peut être croisé avec d'autres données, telles que la dimension économique, exprimée en production standard (PS), le statut juridique de l'exploitation, le volume des unités de travail annuel (UTA), etc. L'enquête européenne FSS donne accès à une classification des exploitations agricoles en huit classes de taille, si l'on inclut celles qui n'ont pas de superficie agricole. Les seuils délimitant le regroupement en catégories peuvent être définis en termes absolus ou relatifs, ainsi qu'en fonction de la distribution statistique propre à chaque pays. Les données statistiques, extraites de la base accessible sur Internet, permettent d'opérer les analyses des structures d'exploitation selon les critères sélectionnés (Eurostat, 2020). L'importance relative de chaque classe de taille physique ou économique, en nombre et en superficie, constitue une donnée essentielle permettant le positionnement dans la structure d'ensemble des exploitations, à l'échelle d'un espace national ou régional. Les petites exploitations se situent à l'une des extrémités d'un continuum statistique dont les grandes exploitations forment l'autre pôle. Des distinctions supplémentaires peuvent être introduites entre les micro-exploitations de moins d'un hectare, les très petites exploitations (moins de deux hectares) et les petites exploitations (entre deux et cinq hectares), elles se révèlent pertinentes pour affiner la description des profils structurels et décrire des réalités économiques et sociales qui renvoient à des trajectoires d'évolution (Figure 1).

L'inscription dans un modèle paysan

L'usage de seuils statistiques éclaire imparfaitement la petite exploitation agricole tant que cette forme sociale n'est pas replacée dans son histoire. En tant qu'objet d'étude, la petite exploitation intéresse divers champs disciplinaires, au premier rang desquels l'histoire rurale, qui a consacré de nombreux travaux aux campagnes européennes tout au long du XXe siècle. Une majorité d'entre eux concernent les échelles du petit pays ou de la province, plus rarement le niveau national (Duby et Wallon,

1975 ; 1976). Peu d'historiens se sont risqués à proposer de vastes synthèses développant des approches comparatives. Dans un ouvrage portant sur les sociétés rurales au XXe siècle, Pierre Barral a esquissé une comparaison des grands systèmes agraires européens (Barral, 1997). Des historiens ont préféré cibler l'observation sur la paysannerie, composante majoritaire des sociétés rurales (Shanin, 1971 ; Rösener, 1994), tandis que l'évolution économique et sociale des campagnes retenaient l'attention d'autres chercheurs (Béaur, 2000).

Une nouvelle génération d'historiens tente à présent de renouveler les approches historiographiques en mettant l'accent sur la diversité des voies du développement agraire (Herment, 2019). Quel que soit l'intérêt de ces mises en perspective historique, la plupart n'abordent pas, ou le font de manière indirecte, la question de la circulation des modèles agraires, c'est-à-dire la façon dont se transmettent les héritages et se reconfigurent les formes socio-spatiales à la suite de bouleversements des régimes agraires.

En choisissant de porter l'attention sur « les aspects sociaux du système agraire », « c'est-à-dire essentiellement les relations entre l'exploitation agricole et la propriété », le géographe Michel Sivignon a proposé de dresser la carte des systèmes agraires européens et de leurs mutations à divers moments clés du XXe siècle (Sivignon, 1996).

S'agissant des campagnes européennes, la constitution de l'exploitation paysanne indépendante (c'est-à-dire libérée des liens de dépendance à l'égard de la grande exploitation), que l'on peut considérer comme le modèle originel de la petite exploitation, a emprunté des trajectoires socio-historiques particulières selon les systèmes sociaux. Les auteurs qui ont rendu compte de l'économie paysanne sont partis de la réalité économique et sociale qu'ils avaient sous les yeux, et leur tentative de généralisation apparaît de ce fait dépendante du contexte historique. De Tchayanov à Mendras, en passant par Redfield, ils ont avancé l'idée que la paysannerie occupe une place à part, et cela quel que soit le système macro-économique ou le monde social et culturel (ou encore la « société englobante ») où elle s'insère.

Tout aussi fondamental pour comprendre la nature de l'économie paysanne est le niveau d'ordre micro-économique d'analyse, qui est celui de l'exploitation. Pour l'économiste Tchayanov, qui observait la campagne russe dans les années vingt du siècle passé, l'unité économique est le foyer paysan en tant que cadre social où se forme « l'équilibre entre le travail et la consommation », mécanisme de base des logiques propres à l'exploitation familiale paysanne et source de son autonomie de fonctionnement (Tchayanov, 1990). Si on peut voir, dans l'exploitation paysanne, le modèle qui est à la source de la petite exploitation en tant que forme sociale sur le sol européen, il est clair que toutes les petites exploitations ne sont pas ou ne sont plus dans ce modèle paysan.

L'épuisement des modèles conceptuels

Sous l'effet de l'élan modernisateur qui s'est emparé de l'agriculture, dans la décennie 1960, les plus petites exploitations paysannes enregistrent un mouvement de recul de leur nombre et un processus de décomposition de ce modèle. À cette époque, tout un courant d'analyse de l'économie rurale qui puise ses références dans le matérialisme historique s'intéresse à « l'agriculture individuelle moderne » et, dans le sillage de Claude Servolin, avance la thèse de « l'absorption de l'agriculture dans le mode de production capitaliste » (Servolin, 1972).

L'examen des rapports entre agriculture et capitalisme renouvelle une lecture de la « petite production marchande », vecteur de résistance ou facteur d'adaptation au gré des intérêts du capitalisme. Le questionnement a trait au mode de reproduction de la « petite production marchande » dont l'objectif n'est pas la mise en valeur d'un capital et l'obtention d'un profit, mais la subsistance du travailleur et

de sa famille, et la reproduction des moyens de production nécessaires pour l'assurer (Servolin, 1989).

L'effervescence théorique autour du paradigme marxiste n'a eu qu'un temps (Pouch, 2020). Pour rendre compte de la résistance de la petite exploitation en tant que forme sociale, des chercheurs en sociologie ont préféré l'inscrire dans le vaste champ d'étude de l'agriculture familiale en proposant un renouvellement de l'approche conceptuelle et de la démarche d'analyse (Lamarche, 1987). C'est ainsi que des travaux de nature comparative portant sur divers pays européens et non européens retravaillent le concept d'analyse de l'exploitation familiale, « unité de production où propriété et travail sont intimement liés à la famille » (Lamarche, 1991).

En se fondant sur une approche empirique des faits sociaux, ces enquêtes permettent de montrer que l'agriculture familiale est une réalité polymorphe qui revêt une diversité de profils, de la forme paysanne à la forme entrepreneuriale, en admettant des formes de transition. Le passage d'un modèle à l'autre correspond à des modes de fonctionnement distincts qui prennent en compte le système sociotechnique de production, le système familial, le système de valeurs et de représentations de l'exploitant et des membres de son ménage. Ces modèles s'organisent selon un continuum de positions et dans le cadre de dynamiques qu'il appartient au chercheur de repérer et d'analyser.

Plus récemment, Bertrand Hervieu et François Purseigle ont tenté de construire une « sociologie des mondes agricoles » dans une démarche de construction idéale typique. Partant du modèle de l'exploitation familiale, ces chercheurs distinguent plusieurs formes d'organisation du métier d'agriculteur : l'agriculture familiale paysanne, l'agriculture familiale moderne (correspondant à l'actuel modèle européen) et l'agriculture de firme, de structure sociétaire et d'assise capitalistique (un modèle en devenir à l'échelle du continent européen). Ces modèles d'agriculture laissent de côté une troisième forme marginalisée, de relégation, « congédiée », voire de « survie » (Hervieu et Purseigle, 2009).

Loin d'avoir disparue du continent européen, cette dernière forme sociale est illustrée par la présence de quelques millions de petites exploitations agricoles à l'est de l'Europe, en Roumanie et en Pologne, ainsi que dans les mondes ruraux post-soviétiques (Dufy et Hervouet, 2017). Dans cet ensemble de pays, de nombreux petits exploitants cherchent leur survie dans une économie de subsistance ou de semi-subsistance qui a retenu l'attention des experts européens (Davidova, 2014). Arguant de la fonction nourricière remplie par cette catégorie d'exploitations, la qualification par une production de subsistance sert à justifier l'introduction de mesures d'aide particulières, telles celles qui sont attribuées dans le cadre du second pilier de la politique agricole commune (PAC). La petite exploitation de « semi-subsistance » devient alors une « catégorie politique », dont l'appareil politico-administratif peut se saisir pour l'ériger en modèle que l'on propose aux petits producteurs « parcellaires » de la campagne roumaine (Roger, 2017).

Dans un travail de caractérisation des petites exploitations, Jacques Rémy a attiré l'attention sur les dimensions institutionnelles de la politique publique et de la statistique agricole qui font de cette catégorie un objet parmi d'autres des mesures de la politique agricole (Rémy, 2007). Au-delà d'un ciblage par une catégorisation d'essence politique, on perçoit l'effet des représentations que les acteurs politiques et sociaux attachent à la petite exploitation, objet de nouveaux enjeux.

Ni l'outil statistique, ni le concept économique, ni la catégorie politique ne parviennent à cerner entièrement les contours de cette forme sociale. À l'échelle de l'agriculture européenne, la catégorie de la petite exploitation n'est pas simplement un élément de la diversité mais contient en elle-même une grande diversité de formes sociales que tentent d'appréhender des approches typologiques s'inspirant de cadres théoriques d'inspiration variée.

Une diversité de formes sociales à contextualiser

Des démarches plus récentes ont entrepris d'observer la diversité de ces formes sociales en les restituant dans leurs contextes locaux, régionaux et nationaux, afin de caractériser leurs trajectoires socio-économiques et les modalités de leur insertion dans les échanges marchands, à l'échelle des régions et des États membres de l'UE. Dans le cadre du projet européen SALSA (2016-2020), la constitution d'une base de données statistiques a permis de positionner les petites exploitations dans divers contextes (Guiomar *et al.*, 2018). À partir de là, de nouvelles approches classificatoires ont esquissé d'intéressantes pistes d'analyse de leur rôle, des fonctions productive et nourricière exercées, pour estimer leur contribution à la sécurité alimentaire et nutritionnelle, et leurs modes d'insertion dans les systèmes alimentaires, à des échelles revêtant une relative pertinence. L'une de ces études examine la manière dont les petites exploitations apportent une production alimentaire durable (disponibilité), en fournissant une nourriture ainsi qu'un revenu aux ménages agricoles (accès et utilisation des biens et capacités), tout en participant à la diversité des systèmes alimentaires et en renforçant la résilience (stabilité) des systèmes alimentaires régionaux (Galli *et al.*, 2020).

Pour être compréhensible et appropriée à l'objectif visé, la différenciation des structures d'exploitation implique une contextualisation à l'échelle régionale, autant pour caractériser leur positionnement dans les profils structurels que pour apprécier leur contribution aux systèmes alimentaires territoriaux (Guarin *et al.*, 2020).

L'analyse citée met en évidence cinq types de petites exploitations, deux dont l'orientation marchande est faible (fermes paysannes et exploitations à temps partiel) et trois autres dont la production s'avère plus fortement tournée vers le marché (entreprises diversifiées, entreprises spécialisées et nouvelles entreprises). Cette typologie permet de mieux comprendre la place qu'occupent les diverses formes revêtues par la petite agriculture dans les États membres de l'UE, retenus par les enquêtes qualitatives (Guarin *et al.*, 2020).

La répartition spatiale des cinq types révèle des ancrages spécifiques. Les « petites exploitations paysannes » et les « exploitations des ouvriers paysans » (à temps partiel) se distinguent par la faiblesse des revenus et le poids relatif de l'autoconsommation. Ces deux formes sociales s'enracinent dans des trajectoires socio-historiques singulières à l'est de l'UE. Les « petites entreprises » aux profils de production diversifié ou spécialisé, mais largement orientés vers le marché selon diverses modalités, caractérisent les zones d'arboriculture et de maraîchage de l'Europe méditerranéenne. Un dernier type regroupe des agriculteurs récemment installés, souvent plus jeunes, pratiquant des systèmes de production innovants. Il reflète le modèle de la « nouvelle petite exploitation » telle que les partisans d'une agriculture alternative le conçoivent aujourd'hui. Son implantation spatiale semble beaucoup moins dépendre des contextes régionaux que les types plus conventionnels.

De cet intéressant ensemble d'études issus du projet SALSA et reposant sur des méthodologies éprouvées, on retiendra que, dans l'espace rural européen, les petites exploitations répondent à un large spectre d'orientations productives, d'une faible à une forte intégration au marché, et de niveaux de spécialisation. Dans des proportions variables selon les pays, une majorité de petites exploitations se trouve en situation de grande vulnérabilité, en raison de trajectoires qui ont verrouillé leur développement, tandis que d'autres, en proportions plus faibles, ont su renouveler leur système de production pour tirer avantage de leur spécialisation. Ce constat conduit à souligner le rôle déterminant que jouent les itinéraires empruntés par ces petites agricultures « renvoyées pour les unes, à un localisme de survie, pour les autres à l'essoufflement » (Hervieu, 2007).

Les petites exploitations, une spécificité du post-collectivisme

L'existence d'une masse de petites exploitations dans les États membres qui ont rejoint tardivement l'UE, au lendemain d'une transition difficile de leur système économique et social, est en soi un problème de fond. À l'échelle européenne, les nouveaux entrants concentrent un peu plus des deux tiers des petites exploitations de l'UE, dont plus de la moitié (58 %) appartiennent à deux pays, la Roumanie et la Pologne (Tableau 1).

Tableau 1. Les petites exploitations de moins de 5 ha (2016) (source Eurostat, Farm structure survey*, calculs de l'auteur).*

Pays	Nombre de petites exploi-tations	en % du nombre total d'exploita tions	SAU des petites exploitations (en ha)	en % de la SAU totale
Bulgarie	167 470	82,6	130 810	2,9
Tchéquie	4 960	18,7	8 750	0,3
Estonie	5 270	31,6	13 090	1,3
Lettonie	24 610	35,2	53 210	2,8
Lituanie	75 200	50,0	202 390	6,9
Hongrie	350 120	81,4	225 060	4,8
Pologne	766 480	54,3	1 908 290	13,2
Roumanie	3 140 770	91,8	3 588 410	28,7
Slovaquie	14 290	55,7	28 820	1,5
UE-28	6 867 400	65,6	10623 150	6,1

Afin d'objectiver la distribution des petites exploitations, une cartographie des zones d'ancrage privilégiés, représentant leur nombre et leur importance relative, a été réalisée (Figure 1). D'autres indicateurs statistiques, tels ceux qui concernent l'intensité en capital et en travail, auraient sans doute apporté une caractérisation plus affinée. Ainsi les données estimant la destination de la production, la part de l'autoconsommation et celle du marché permettraient de distinguer les exploitations de subsistance et de semi-subsistance, des exploitations marchandes. Si l'enquête FSS d'Eurostat dénombre les exploitations qui consomment plus de 50 % de leur production finale, cette donnée n'est pas renseignée en Bulgarie et se révèle peu fiable ailleurs, notamment en Pologne où les variations de cette donnée semblent aléatoires (compte tenu de la connaissance que l'on en a).

Les données statistiques attestent d'une masse considérable de petites exploitations dans plusieurs de ces pays. La Roumanie, la Hongrie, la Bulgarie se distinguent par un nombre élevé de petites exploitations de moins de 5 ha, dont la part relative est supérieure à 80 % du nombre total des exploitations. Les trois quarts de ces petites exploitations appartiennent à la catégorie de moins de 2 ha et sont principalement tournées vers l'agriculture de subsistance. En Roumanie et en Pologne, ces petites exploitations détiennent une part notable de la SAU, respectivement 28,7 % et 13,2 %, mais cette valeur peut atteindre et dépasser 30 % dans plusieurs régions (figure 2).

La figure 1 illustre la répartition spatiale des petites exploitations, en chiffres absolus comme en valeur relative de la SAU occupée. La distinction qui a été délibérément introduite entre les très petites exploitations de moins de 2 ha et celles qui ont entre deux et 5 ha (quadrants à l'intérieur des cercles proportionnels) permet de développer une hypothèse quant à l'origine de leurs dimensions et d'apporter une interprétation plus fine de leur rôle économique et social.

À elle seule, la Roumanie concentre plus de trois millions de petites exploitations, qui forment les 9/10 du nombre total des exploitations et qui totalisent une part notable de la SAU (28,7 %). Cette proportion atteint ses valeurs les plus élevées dans les régions du nord-ouest (35 %), du nord-est (40 %) et du sud-ouest (44 %), tandis que les régions du

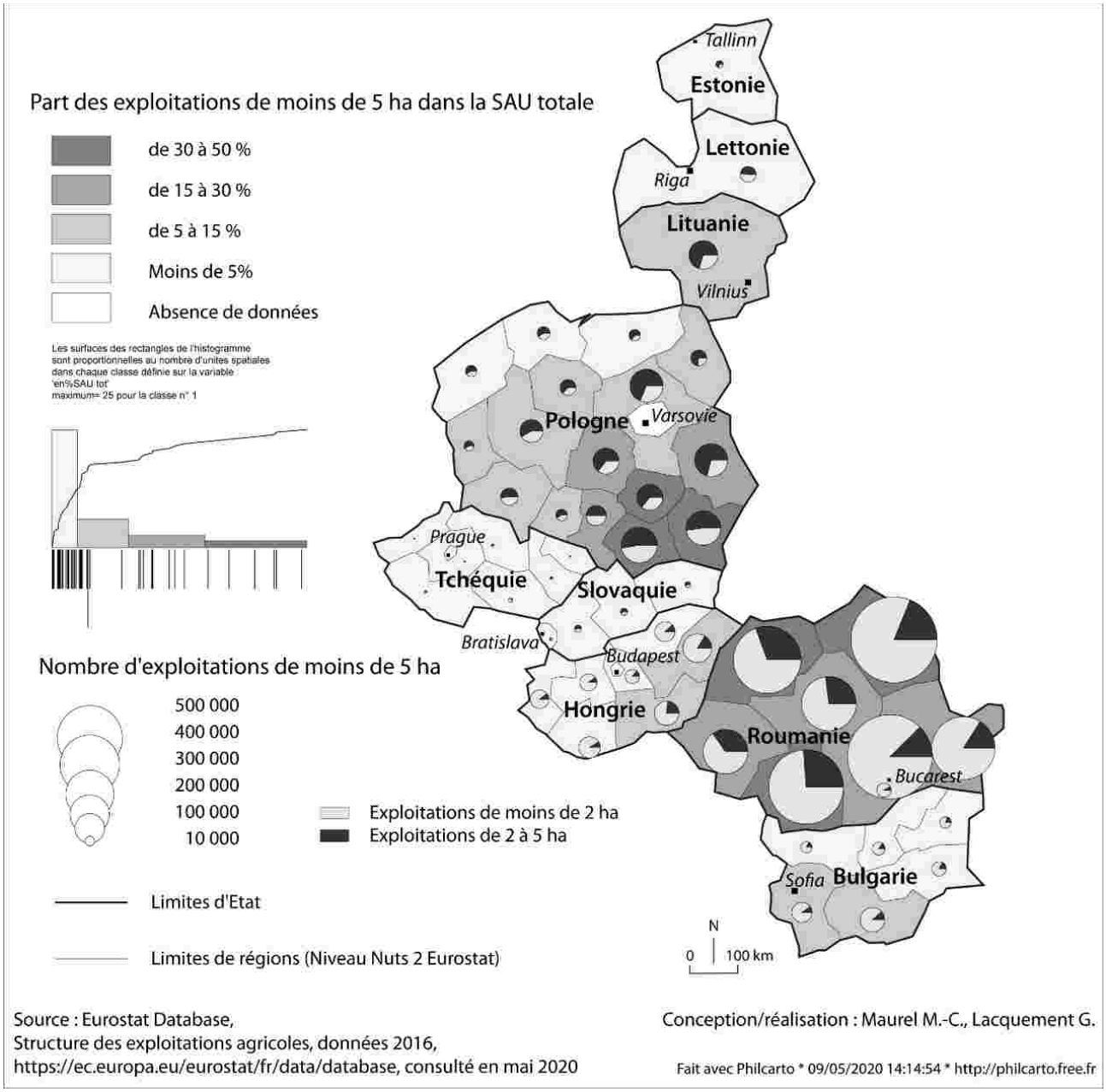


Figure 1. Répartition spatiale des petites exploitations agricoles en Europe centrale (2016).

centre et du sud enregistrent des valeurs plus faibles. À l'ouest du pays, dans le Banat, au sud-est, dans les plaines du Bas Danube, les petites exploitations sont en importance réduite du fait de la concentration foncière au profit des très grandes structures. La place singulière de cette « agriculture parcellaire » pratiquée par des millions de ménages ruraux aux très faibles revenus et qui fonctionnent quasiment en marge des circuits marchands a retenu l'attention d'Antoine Roger, chercheur en science politique, qui a défini son mode de reproduction fondé sur des pratiques d'autoconsommation, développées au sein

Figure 2. Habitat paysan, Pasieka, Brzeznica, Petite Pologne (cliché Maria Halamska).

d'unités familiales pluri-générationnelles. Dans un récent ouvrage, il s'interroge sur l'énigme théorique que représente la perpétuation de ces formes non capitalistes (Roger, 2019).

En Hongrie, la catégorie des petites exploitations utilise moins de 5 % de la SAU. Majoritairement il s'agit de très petites exploitations de moins de 2 ha, mises en valeur par des ménages ruraux qui fonctionnent dans un mode dominant d'autoconsommation. Comme en Roumanie, ces petites exploitations sont bien visibles dans le paysage agraire, sous la forme de ceintures de vergers, de potagers et de cultures vivrières enserrant les villages et formant avec les zones bâties ce que l'on appelle l'*intravilán* du territoire communal. En Bulgarie, les très petites exploitations sont encore nombreuses en chiffres absolus et relatifs, mais ne détiennent plus qu'une très faible part de la SAU (2,8 %). Des trois États baltes, c'est la Lituanie qui compte le plus grand nombre de petites exploitations (50 % du nombre total et 6,9 % de la SAU), mais, à la différence des cas précédents, la plupart d'entre elles se rangent dans la catégorie de 2 à 5 ha. Ces exploitations ont pour origine l'attribution aux ménages ruraux de trois hectares, qui ont permis d'élargir de manière significative les lopins individuels, autrefois concédés en usufruit par les kolkhoz.

La petite exploitation « quasi paysanne »

En Pologne, la catégorie des exploitations de moins de 5 ha regroupe un peu plus de la moitié de l'ensemble des exploitations agricoles. La très grande majorité est constituée par des exploitations de 2 à 5 ha, dont l'importance singularise la structure foncière du pays. Condamnées à ne pouvoir s'agrandir à l'époque du système socialiste, elles ne sont pas davantage parvenues à le faire au cours des dernières décennies (Maurel, 1989 ; Maurel *et al.,* 2003).
Il s'agit de petites exploitations en propriété de l'exploitant, transmises d'une génération à l'autre, sans changer de configuration. Leur implantation est particulièrement affirmée dans le quart sud-est du pays, en Petite Pologne et dans les Basses-Carpates où elles constituent plus des 4/5 du nombre total des exploitations avec respectivement 49 % et 44 % de la SAU, et dans la voïvodie de Sainte-Croix (les deux tiers des exploitations et 30 % de la SAU).
À partir de ce pôle de forte densité de la petite exploitation, leur nombre et leur importance relative décroissent vers l'ouest en Haute-Silésie, vers le centre, dans la voïvodie de Łodz, à l'est, dans celle de Lublin. Dans le reste du pays, les petites exploitations n'occupent qu'une fraction minoritaire des superficies et leur présence se fait discrète dans les voïvodies septentrionales (Poméranie et Warmie-Mazurie).
Selon l'histoire agraire propre à chaque région, la petite exploitation y revêt des traits spécifiques. Dans le quart sud-est, il s'agit de la petite exploitation des ménages paysans-ouvriers, correspondant à une forme de pluriactivité, fortement encouragée par le développement industriel à l'époque communiste. Ailleurs ces petites exploitations fonctionnent dans un mode de production « quasi paysan », dans les mains de ménages qui tirent l'essentiel de leurs revenus des transferts sociaux (pensions) et des activités extérieures de leurs membres (Halamska, 2021).

L'hypothétique retour paysan

Le constat de la diversité de formes revêtues par la petite exploitation pose la question de sa filiation et de son devenir. Au lendemain d'un changement radical de système économique, les chances d'une renaissance de l'exploitation familiale, dans des mondes agricoles ayant subi la collectivisation, quelles qu'aient été les variantes nationales de ce système, ont fait l'objet d'appréciations de nature différente. Seule la Pologne avait conservé quelques millions de petites exploitations individuelles, étendues sur les trois quarts de la superficie agricole du pays, mais elle était confrontée au défi de leur modernisation. Partout ailleurs (mis à part l'ex-Yougoslavie), la petite exploitation paysanne avait été éliminée ou plutôt réduite à la taille d'un « lopin auxiliaire » à caractère vivrier. L'enjeu de la transformation était le suivant : comment transformer les structures agraires de manière à les rendre compatibles avec une économie régulée par le marché et ouverte aux échanges extérieurs ? Confrontées au choix d'un nouveau modèle agricole, les sociétés d'Europe centrale ont répondu par des politiques de privatisation de la terre se référant au passé de réformes agraires qui avaient généralisé la petite propriété paysanne. Selon des modalités variées, les politiques de redistribution des terres, d'inspiration égalitariste, ont permis d'accroître fortement le nombre des petites exploitations détenues par les ménages ruraux, en Hongrie, en Lituanie, et surtout en Roumanie. Les parcelles attribuées ou restituées ne pouvaient servir d'assise adéquate à la constitution d'exploitations agricoles viables, si bien que dans leur grande majorité, ces micro-exploitations sont les héritières en ligne directe des lopins concédés aux ménages travaillant dans les grandes exploitations collectives et sur lesquels ils pratiquaient une petite agriculture, baptisée « économie auxiliaire » par le régime communiste, parce qu'elle assurait une part

Figure 3. Cultures légumières dans le village de Markóc, Baranya, en Hongrie, où le maire a attribué des parcelles pour que les ménages sans terre puissent produire leur nourriture (cliché M.-C. Maurel).

prépondérante de l'approvisionnement alimentaire des populations vivant à la campagne. Beaucoup de ménages ruraux ne souhaitaient pas revenir au modèle de la petite exploitation paysanne d'autrefois, ils ont pu un temps l'envisager comme une solution de repli face à la montée du chômage et pour assurer un complément de revenu.

Ce retour en nombre de la petite exploitation a été mis en avant par plusieurs auteurs pour faire valoir l'hypothèse d'une « repaysannisation » d'espaces ruraux encore densément peuplés (Cartwright, 2001). A l'appui de la thèse de la renaissance de l'exploitation paysanne, ils ont allégué les atouts de savoir-faire que l'économie auxiliaire aurait permis de préserver (Streith, 1995 ; 2005). Un groupe de recherche a exploré cette hypothèse en comparant les petites paysanneries de l'est et du sud (Streith, Gana, 2008). Repris et amplifié, le thème du devenir de la petite exploitation paysanne se trouve au cœur d'analyses mettant en évidence des stratégies de résistance, en Pologne et en Lettonie (Czekaj *et al.*, 2020). Tout un courant de recherche se plaît à souligner la faculté de résilience de l'exploitation familiale, c'est-à-dire sa capacité à persister sur le long terme en amortissant les chocs et en s'adaptant au changement (Darnhofer *et al.*, 2016). Le comportement des petits exploitants roumains est considéré comme une forme de résilience, répondant au triple défi de la restitution foncière, de la restructuration de l'économie, du poids démographique des inactifs et des retraités dans les campagnes (Tudor, 2015). Face à la crise ouverte par la décollectivisation, la petite exploitation permet de donner du travail aux membres du ménage, de couvrir leurs besoins

de consommation alimentaire et, de cette manière, de faire face aux situations de pauvreté. Portant sur les pays qui ont traversé l'expérience du socialisme, plusieurs auteurs se sont intéressés aux « petits exploitants postsocialistes » (*post socialist smallholders*), à l'ampleur de leur résistance, souvent silencieuse, voire invisible. Ils mettent en exergue les dynamiques des luttes sociales dans lesquelles ils sont engagés (Visser *et al*., 2019) et en déduisent que, même si ces petits exploitants ne constituent pas une alternative explicite à la grande agriculture, leur contribution participe d'un projet de souveraineté alimentaire. Cette vision idéalisée de la résilience des petits exploitants postsocialistes puise ses arguments rhétoriques dans la figure mythique du paysan et des « armes du faible » auxquels celui-ci aurait recours (Scott, 1985). Dans un catalogue des vertus prêtées aux petites exploitations, on n'hésite pas à faire valoir leurs performances économiques (l'intensivité), le couplage des cultures et de l'élevage, le respect de l'environnement et jusqu'à la conservation d'un paysage archaïque susceptible d'attirer les touristes. Représentation idyllique pour qui n'a pas partagé le quotidien de précarité et de pénibilité de ces petits producteurs… Le sociologue hongrois Imre Kovach a récemment dénoncé la situation indigne réservée par l'État populiste aux ménages ruraux contraints de participer à des programmes de mise en valeur des terres communes (*Social Land Program*) pour bénéficier des modestes aides sociales octroyées par les municipalités rurales (Kovach, 2021).

L'héritage du lopin vivrier

L'hypothèse de la résilience de la petite exploitation sur un mode quasi survivaliste tient-elle la route ? L'itinéraire socio-historique menant des lopins de l'économie auxiliaire aux petites exploitations du post collectivisme apporte une clé de compréhension. Il faut rappeler le poids des normes imposées par le système collectiviste et qui encadraient le mode de fonctionnement des lopins (Maurel, 1985). Ce cadre normatif orientait les logiques, les pratiques et les représentations des petits producteurs vivriers, définissant un modèle de référence par rapport auquel s'organisaient leurs stratégies. Par la modestie des moyens et des techniques mis en œuvre, par l'organisation familiale du travail, la petite agriculture relevait d'un mode de production domestique tout en étant articulée à l'économie collective. Tantôt tolérées, tantôt encouragées par le pouvoir politique, ces micro-exploitations remplissaient des fonctions spécifiques, complémentaires du secteur collectif : l'approvisionnement en produits frais (fruits, légumes, œufs, volailles) des populations rurales et, dans une large mesure, urbaines (*via* les liens de solidarité familiaux). Les lopins n'étaient jamais complètement autonomes mais entretenaient des relations étroites, d'amont et d'aval, avec les grandes exploitations collectives. Les ménages livraient leur surplus de production aux exploitations collectives qui les intégraient dans leurs résultats, en échange d'une assistance technique et de la fourniture de divers services. Dans le cas des petits producteurs hongrois qui excellaient dans l'intensification agricole, ces relations répondaient au principe de l'intéressement économique, dans la Roumanie de Ceaușescu, ces livraisons obligatoires étaient réglées de manière plus coercitive.

Des exploitations paysannes dénaturées par l'économie collective

En Pologne, l'insertion des exploitations dites « individuelles », en réalité familiales, dans l'économie administrée, le contrôle exercé par les réseaux coopératifs d'amont et d'aval avaient déformé leur mode de fonctionnement par l'imposition d'un rapport dissymétrique dénaturant la logique de l'exploitation paysanne, telle que Tchayanov l'avait analysée (Maurel, 1989). Dans tous les cas de figure trop brièvement évoqués ci-dessus, les lopins et les petites exploitations vivaient en symbiose avec l'économie collectiviste dont ils faisaient partie. C'est ce modèle vivrier originel, en tous points singulier, et non le modèle paysan, qui sous-

tendait les représentations idéelles des petits producteurs, par ailleurs transformés en salariés agricoles et en ouvriers-paysans.
Dans ce contexte, le retour au modèle idéel de la petite exploitation paysanne était un leurre. Telle qu'elle se présente dans la plupart des pays d'Europe centrale et balte, la petite exploitation est une forme héritée de l'époque collectiviste. Si, en raison d'une trajectoire spécifique, la petite exploitation polonaise en offre une version différente, elle partage l'absence de perspective d'avenir de cette masse de petits producteurs positionnés en marge de l'économie de marché (Maurel *et al.*, 2003). Les trajectoires de filiation s'avèrent plus complexes que ce qu'une identification paysanne, voire néo-paysanne, le laisserait entendre.
Dans les pays sortis du collectivisme, la petite exploitation est aujourd'hui une forme sociale en repli. Les évolutions structurelles enregistrées, au cours de la période 2005-2016, témoignent d'une contraction réelle, quoique d'ampleur variable du nombre et de la superficie des petites exploitations de moins de 5 ha (tableau 2).

Tableau 2. Évolution des petites exploitations de moins de 5 ha (2005-2016) (source Eurostat, Farm structure survey, *calculs de l'auteur).*

Pays	Évolution du nombre des exploitations de moins de 5 ha (en %)	Évolution de la SAU des exploitations de moins de 5 ha (en %)
Bulgarie	-67,2	-63,5
Tchéquie	-77,8	-73,7
Estonie	-58,1	-58,2
Lettonie	-59,6	-59,2
Lituanie	-42,1	-44,7
Hongrie	-45,4	-37,3
Pologne	-56,2	-26,4
Roumanie	-18,9	-29,7
Slovaquie	-76,8	-34,7

Le constat de ce reflux, intervenant après une forte progression du nombre de ces petites exploitations, conduit à s'interroger sur la capacité effective des petites exploitations à s'adapter au nouveau contexte économique, au-delà du rôle qu'elles ont joué pour permettre à des populations rurales encore denses de surmonter la crise de transition. Si la réduction en nombre et en superficie de la petite exploitation concerne l'ensemble de ces pays, elle est la plus accentuée là où domine la très grande exploitation (Tchéquie, Slovaquie, Estonie, Bulgarie), et plus limitée dans les pays qui concentrent le plus de petites exploitations (Roumanie, Pologne), tandis que le recul se situe à des niveaux intermédiaires en Lituanie et en Hongrie (Figure 3).
Ce processus découle en grande partie du non-enregistrement de ces entités productives, dont le rôle principalement domestique est l'expression d'une tradition d'auto-approvisionnement pratiqué par les ménages ruraux dans le cadre des jardins-potagers. La plupart du temps ces parcelles, situées dans le prolongement de l'habitation individuelle, ou à proximité immédiate, ne sont pas soumises à déclaration officielle si bien que leur contribution à l'approvisionnement alimentaire est difficilement évaluable (Svobodová, 2021).

Une forme sociale malmenée par la PAC ?

Le changement structurel des dernières décennies confirme l'inexorable recul de la petite exploitation. L'élimination de cette forme sociale est une affaire entendue en Tchéquie, où la statistique ne l'enregistre plus, ainsi qu'en Slovaquie et en Hongrie, même si dans ce dernier pays le processus prendra encore quelque temps. La Pologne, la Lituanie, la Roumanie semblent faire exception, en apparence au moins. Pourtant, dans aucun de ces pays, la petite exploitation paysanne n'est portée par un projet d'avenir. D'une taille inférieure à 5 ha, pratiquant un mode de production autarcique, dénommé « agriculture

Figure 4. Une petite exploitation "relique" à Sołtyse, commune de Brzeznica, Petite Pologne.

de semi-subsistance » par certains dispositifs de la PAC, cette forme sociale, héritée d'un passé mythifié, est partout en voie d'exclusion. En Roumanie, l'élimination des petits producteurs que les politiciens ont tenté de qualifier de « petite agriculture capitaliste » est inégalement avancée selon les régions (Roger, 2019). Après un illusoire accès à la propriété privée, leur marginalisation conduit à la dépossession des petits exploitants et à l'effacement de la figure sociale paysanne. En Pologne, les petites exploitations « quasi paysannes » forment un groupe passif, sans lien avec le marché, sans projet et sans capacité d'innovation, et dont les ménages vivent principalement de revenus non agricoles. Ayant réduit leur volume de production, simplifié leur système de culture, abandonné la production animale, ces exploitants qui bénéficient d'avantages sociaux significatifs (un régime de sécurité sociale généreux et une fiscalité légère sur le foncier) sont-ils encore des agriculteurs ? La reproduction de ces exploitations procède d'une logique singulière qui n'a rien à voir avec une quelconque recherche de viabilité économique voire écologique, mais qui est directement tributaire du soutien apporté par le parti conservateur au pouvoir à sa base électorale (Halamska, 2021). La Lituanie présente une bipolarité de même nature, avec la survie de micro-exploitations de subsistance qui n'ont pas perçu l'impératif de l'élargissement et se retrouvent sans successeur.

Le constat de l'existence d'une masse de petites exploitations à l'est de l'Europe ne peut rester occulté comme il l'est depuis plusieurs décennies, avec la complicité des responsables politiques des pays concernés et la cécité des instances de Bruxelles. Le débat concernant la place de la petite exploitation, d'abord invitée à jouer un rôle de tampon social au début de la transition, puis appelée à se développer grâce à l'octroi d'aides financières d'un montant modeste, n'a pas été tranché alors que l'on s'attendrait à ce qu'il le soit. Ce défaut de prise de décision peut être mis en relation avec les effets de ciblage des mesures de la PAC.

Si les aides directes versées au titre du premier pilier ont été un vecteur déterminant de la

concentration foncière, comme cela a été démontré (Maurel, 2021), en revanche les mesures de soutien au développement des petites exploitations, relevant du second pilier, dépendaient pour partie des choix effectués par les États membres. Pour la période 2014-2020, le second pilier a fait l'objet d'une redéfinition des priorités avec la possibilité pour les États membres de les regrouper en sous-programmes thématiques : petites exploitations, jeunes agriculteurs, circuits d'approvisionnement courts, zones de montagne. Tout indique que les États dotés d'une lourde charge en petits exploitants ont souhaité les protéger en mettant en œuvre un éventail de mesures en leur faveur. Toutefois le ciblage par la catégorisation tel que le proposait le dispositif applicable aux exploitations de semi-subsistance est demeuré largement inopérant. Il ne suffit pas de nommer positivement une catégorie d'exploitations pour alléger le déterminisme socio-historique qui pèse sur son devenir.

Le regain, enregistré au lendemain de la décollectivisation, procédait davantage du désir de se réapproprier un bien que de l'ambition d'entreprendre un projet économique. Pour des millions de petits propriétaires rétablis dans leurs droits de propriété, l'accès à la terre a revêtu une signification ambiguë, associant à la portée symbolique de l'attachement au sol, l'assurance d'un statut social et un semblant d'indépendance économique. Mais ni par leur logique productive, ni par leur orientation vivrière, les petites exploitations ne répondent aux conditions requises pour s'insérer dans une économie de marché. Si pour des raisons d'ordre politique, la pénétration du capitalisme en agriculture a laissé se perpétuer de petits exploitants obéissant à une autre logique productive, rien ne permet d'avancer qu'une telle coexistence pourrait se révéler durable.

Conclusion

Si les travaux d'analyse témoignent d'un intérêt renouvelé porté à la problématique de la petite exploitation, on demeure perplexe devant l'image vertueuse qui lui est accolée. On est en droit de se demander s'il y a encore une place pour une exploitation de petite taille dans les agricultures de l'UE lorsque s'affirme un nouveau capitalisme agricole fondé sur la suprématie de la firme agricole (Purseigle, 2017). Au moment où s'accélère la concentration foncière au profit des seules grandes entreprises, lorsque les exploitations familiales s'émancipent du modèle traditionnel et que de nouvelles stratégies réorganisent les chaînes de valeur du secteur agroalimentaire, quel rôle peut-on encore affecter à la petite exploitation ? N'est-il pas excessif de la considérer comme un maillon essentiel de la sécurité alimentaire tant au niveau des agricultures nationales que des bassins d'approvisionnement locaux et régionaux ? Sur quelles bases concevoir et justifier une telle politique ? À travers ce point de vue dont la teneur se démarque du discours dominant, on a souhaité aborder la question en posant un regard distancié sur des réalités sociales inscrites dans des trajectoires spécifiques.

Références

Barral P. 1978. *Les sociétés rurales du XXe siècle*. Armand Colin, Paris.

Béaur G. 2000. *Histoire agraire de la France au 18e siècle*. SEDES, Paris.

Cartwright AL. 2001. *The Return of the Peasant. Land Reform in Post-communist Romania*. Routledge, New York.

Czekaj M, Adamsone-Fiskovica A, Tyran E, Kilis E. 2020. Small farms' resilience strategies to face economic, social, and environmental disturbances in selected regions in Poland and Latvia, *Global Food Security*, 26, 100416.

Czibere I, Kovách I. 2021. State Populism in Rural

Hungary, *Rural Sociology*, 1-25.

Darnhofer I, Lamine C, Strauss A, Mireille N. 2016. The resilience of family farms: Towards a relational approach, *Journal of Rural Studies,* 44, 111-122.

Davidova S. 2014. Small and Semi-Subsistence Farms in the EU: Significance and Development Paths*, EuroChoices*, 13 (1), 5-9.

Dufy C, Hervouet R. 2017. Mondes ruraux et marchés dans l'Europe postcommuniste, *Revue d'études comparatives Est-Ouest,* 48, 1-2, 9-20.

Duby G, Wallon A. 1975-1976. *Histoire de la France rurale*. Editions du Seuil, Paris.

Eurostat. 2020a. https://ec.europa.eu/eurostat/fr/web/agriculture/overview, consulté en mai 2020.

Eurostat. 2020b. *Database, Structure des exploitations agricoles, données, 2005, 2016*, https://ec.europa/fr/data/database, consulté en mai 2020.

Gaborieau I. 2018. *Agriculture : des ruptures à la transition*, Pour, 2-3, 234-235.

Galli F, Grando S, Adamsone-Fiskovica A, Bjorkhaug H, Czekaj M, Duckett DG, Almaas H, Karanikolas P, Moreno-Pérez OM, Ortiz-Miranda D, Pinto-Correia T, Prosperi P, Redman M, Rivera M, Toma I, Sanchez-Zamora P, Sumane S, Zmija K, Brunori G. 2020. *How do small farms contribute to food and nutrition security? Linking European small farms, strategies and outcomes in territorial food*, Global Food Security, 26, 100427.

Guarín A, Rivera M, Pinto-Correia T, Guiomar N, Sumane S, Moreno-Perez OM. 2020. A new typology of small farms in Europe, *Global Food Security,* 26(3), 100389.

Guiomar N, Rivera M, Pinto-Correia M, Guiomar N, Sumane S, Moreno-Pérez OM. 2018. Typology and distribution of small farms in *Europe: Towards a better picture*, *Land Use Policy*, 7, 784-798.

Halamska M. 2021. *Continuity and Change. Rural Poland 1918-2018*. IRWIR PAN, Varsovie.

Herment L. 2019. *Histoire rurale de l'Europe, XVIe-XXe siècle*. Éditions EHESS, Paris.

Hervieu B. 2007. Des agricultures à nommer, *Pour*, 2, 194, 49-54.

Hervieu B, Purseigle F. 2009. Pour une sociologie des mondes agricoles dans la globalisation, *Études rurales,* 1(183), 177-200.

Hubert B, Couvet D (eds). 2020. *La transition agroécologique. Quelles perspectives en France et ailleurs dans le monde ?,* Presses des Mines, Paris.

Kautsky K. 1900. *La question agraire. Étude sur les tendances de l'agriculture moderne*. Giard & Brière, Paris.

Lamarche H. 1987. Crises et permanence de l'exploitation familiale en France, *Sociologie du travail*, 4, 443-458.

Lamarche H. 1991. *L'agriculture familiale. Une réalité polymorphe.* L'Harmattan, Paris.

Maurel MC. 1985. La petite agriculture en URSS et en Europe de l'Est, *Études rurales,* 99-100, 157-178.

Maurel MC. 1989. *Les paysans contre l'État. Le rapport de forces polonais*. L'Harmattan, Paris.

Maurel MC, Halamska M, Lamarche H. 2003. *Le repli paysan. Trajectoires de l'après-communisme en Pologne.* L'Harmattan, Paris.

Maurel MC. 2021. *Terre et propriété à l'est de l'Europe, Faisceau de droits, relations de pouvoir.* Presses universitaires de Franche-Comté, Besançon.

Merlet M. 2017. *Grande production ou petite production ? La « question agraire » aujourd'hui.* Options méditerranéennes, Série A : Séminaires Méditerranéens. Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes International, 117.

Pouch T. 2020. Quand les économistes traitaient de la question agraire, *Œconomia*, 10-1.

Purseigle F, Nguyen G, Blanc P. 2017. *Le nouveau capitalisme agricole. De la ferme à la firme.* Presses de Sciences Po, Paris.

Rémy J. 2007. Les petites exploitations dans la politique agricole*, Pour*, 2 ,194, 43-48.

Rivera M, Guarin A, Pinto-Correia T, Almaas H, Arnalte Mur L, Burns V, Czekaj M, Ellis R, Galli F, Grivins M, Hernandez P, Karanikolas P, Prosperi P, Sanchez-Zamora P. 2020. Assessing the role of small farms in regional food systems in Europe: evidence from a comparative study*, Global Food Security*, 26, 100417.

Roger A. 2017. *Ajuster la représentation professionnelle aux politiques économiques. L'invention de la « petite agriculture capitaliste » en Roumanie, Revue d'Études Comparatives Est-Ouest,* 48 (1-2), 21-56.

Roger A. 2019. *Le capitalisme à travers champs. Étudier les structures politiques de l'accumulation.* Le bord de l'eau, Bordeaux.

Rösener W. 1994. *Les paysans dans l'histoire de l'Europe.* Éditions du Seuil, Paris.

SALSA. 2021. *Small farms, small food businesses and sustainable food and nutrition security.* http://www.salsa.uevora.pt/about-salsa/, consulté en avril 2021.

Scott JC. 1985. *Weapons of the Weak: Everyday Forms of Peasant Resistance*. Yale University Press, New Haven.

Shanin T. 1971. *Peasants and Peasant Societies*. Penguin Books, Londres.

Servolin C. 1972. *L'absorption de l'agriculture dans le mode de production capitaliste.* In Tavernier Y, Gervais M, Servolin C (eds). *L'univers politique dans le mode de production capitaliste.* Presses de Sciences Po, Paris*,* 41-72.

Servolin C. 1989. *L'agriculture moderne*. Éditions du Seuil, Paris.

Shanin T. 1971. *Peasants and Peasant Societies*. Penguin Books, Londres.

Sivignon M. 1996. *Les systèmes agraires européens : héritages, mutations, frontières.* In Jollivet M, Eizner N (eds) *L'Europe et ses campagnes*. Presses de Sciences Po, Paris.

Streith M. 1995. Cultivateurs du Mecklembourg. Survie d'un savoir-faire, *Études Rurales,* 138-140, 185-194.

Streith M. 2005. *Dynamiques paysannes en Mecklembourg. Survie d'un savoir-faire.* LIT Verlag, Münster/Berlin.

Streith M, Gana A (eds). 2008. *Restructurations agricoles à l'Est et au Sud : regards croisés.* Armand Colin, Paris.

Streith M, Saïdi MR (eds). 2013. *Petites paysanneries au Nord et au Sud de la Méditerranée. Questions de méthodes (I).* Publisud, Paris.

Svobodová I, Drlik J, Spesna D, Delin M. 2021. Food self-provisioning in the Czech Republic- A comparison of suburban and peripheral regions of rural South Moravia, *European Countryside,* 13(3), 516-535.

Tchayanov A. 1990. *L'organisation de l'économie paysanne*, Librairie du Regard, Paris.

Tudor M. 2015. Small scale agriculture as a resilient system in rural Romania, *Studies in Agricultural Economics*, 117, 27-34.

Van der Ploeg JD, Laurent C, Blondeau F, Bonnafous P. 2009. Farm diversity, classification schemes and multifunctionality, *Journal of Environmental Management,* 90(2), S124-S131.

Visser O, Dorondel S, Jehlička P, Spoor M. 2019. Post-socialist smallholders: silence, resistance and alternatives, *Canadian Journal of Development Studies / Revue canadienne d'études du développement,* 40(4), 499-510.

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

Rapporteurs
1. Eleni Panagouli, géographe-chercheuse à laNational Technical University of Athens (NTUA)

2. Viviane de Lafond, ingénieur agronome, chercheuse associée à l'UMR LADYSS, sur le projet européen RURALIZATION.

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

Reçu
6 mai 2021
Accepté
24 octobre 2021

Publié
3 novembre 2021

Citation
Maurel MC. 2021. La petite exploitation agricole dans l'espace rural européen. Retour sur une figure controversée, *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF),* 12(2), 1-18. https://doi.org/10.58630/pubac.not.a686459.

Marie-Claude Maurel est directrice d'études à l'EHESS (Paris), membre du Centre d'études des mondes russe, caucasien et centre européen et 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)
Note de recherche

Des cristaux d'Auguste Laurent et des techniques d'analyse optique de Jean-Baptiste Biot furent directement à l'origine de la découverte de la chiralité par Louis Pasteur

Crystals from Auguste Laurent and the optical analysis techniques from Jean-Baptiste Biot were directly responsible for the discovery of chirality by Louis Pasteur

Hervé This [1,2]

1 Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR 0782 SayFood, 75005, Paris, France
2 Group of Molecular Gastronomy, Inrae-AgroParisTech International Centre for Molecular Gastronomy

Correspondance :
herve.this@inrae.fr

Résumé
L'histoire de la séparation de deux des acides tartriques par Louis Pasteur est compliquée, parce que (1) les noms des composés discutés ont changé au cours du temps, (2) les notions de « molécule » et d'« atome » n'étaient pas, au 19e siècle, celles que nous avons aujourd'hui, (3) les textes historiques sont nombreux et parfois contradictoires, comme on le verra ici par des exemples choisis, et (4) nombre de commentaires des travaux pastoriens ont été hagiographiques ou nationalistes, dès le vivant de Pasteur, propageant donc des informations erronées. Dans cet article, on établit notamment que, contrairement à une idée répandue, la séparation des deux types de cristaux de tartrates présents dans les mélanges

racémiques n'a pas nécessité d'habileté ou d'acuité visuelle particulièrement remarquables, comme cela a été dit ; en revanche, Pasteur a dû apprendre les techniques de cristallisation, afin de former les gros cristaux (jusqu'à plusieurs centimètres de long) qu'il explorait par des techniques d'analyse optique alors modernes. Pasteur doit surtout être crédité d'opiniâtreté dans ses études de cette question, et son travail s'inscrit dans la longue histoire de l'acide tartrique et des tartrates, au cours de laquelle Jean-Baptiste Biot et Auguste Laurent, notamment, ont joué un rôle primordial, souvent mésestimé. Enfin la reconnaissance des divers acides tartriques et des divers tartrates n'est ni le début, ni la fin de l'histoire de la chiralité.

Abstract
The history of Louis Pasteur's separation of two kinds of tartaric acids is complicated, because (1) the names of the compounds discussed changed over time, (2) the notions of molecule and atom in the 19th century were not those we have today, (3) the historical texts are numerous and sometimes contradictory, as will be seen here by selected examples, and (4) many of the commentaries on Pasteur's work have been hagiographic or nationalistic, as early as Pasteur's lifetime. In particular, this article establishes that, contrary to popular belief, the separation of the two types of tartrate crystals present in the racemic mixture did not require particularly remarkable skill or vision, as has been stated; instead, Pasteur must have learned the techniques of crystallization, in order to form the crystals (which were several centimeters long) he was exploring by then-modern optical analysis techniques. Pasteur must above all be credited with persistence in his studies of this question, and his work is part of the long history of tartaric acid and tartrates during which Jean-Baptiste Biot and Auguste Laurent, in particular, played a primordial role, often underestimated. Finally, the recognition of the various tartaric acids and tartrates is neither the beginning nor the end of the history of chirality.

Mots clés
Jean-Baptiste Biot, Auguste Laurent, Louis Pasteur, dissymétrie, chiralité, histoire des sciences, tartrates

Keywords
Jean-Baptiste Biot, Auguste Laurent, Louis Pasteur, disymetry, chirality, history of sciences, tartrates

Introduction

Acides tartrique, racémique, paratartrique, dextroracémique, lévoracémique... Tartrates, racémates, paratartrates, thannates, bitartrates, hydrogénotartrates... Activité optique, polarisation rotatoire… Asymétrie, dissymétrie, chiralité… Il y a de quoi se perdre dans ces dénominations, pour certaines périmées, tout comme on se perd dans les récits contradictoires des découvertes initiales qui ont conduit aux études de ce qui est aujourd'hui nommé « chiralité » (Mislow, 1999 ; Dunitz, 2019 ; Petitjean, 2020). De surcroît, les textes hagiographiques ont obscurci l'histoire de l'étude des acides tartriques et de leur influence sur la lumière (« activité optique »), notamment en laissant imaginer une habileté manuelle extraordinaire et une acuité visuelle particulièrement aiguë de Louis Pasteur (1822-1895), qui aurait, par un tour de force scientifique, trié les divers acides tartriques, sous le microscope, à la pince (Vallery Radot, 1922 ;Dri, 1999).
Dans le présent article, qui arrive après une longue série d'études de la question du « dédoublement des tartrates » (Gal, 2008, 2011, 2017, 2019 ; Flack, 2009), on veut montrer que c'est plutôt une bonne connaissance de la cristallographie, fondée sur une série de découvertes de physique à propos de la polarisation de la lumière, qui a permis à Pasteur de faire un progrès - et un seulement - dans une longue série d'études scientifiques qu'il n'a pas initiée et à laquelle il n'a pas mis le point final. On notera que le réexamen de cette histoire est

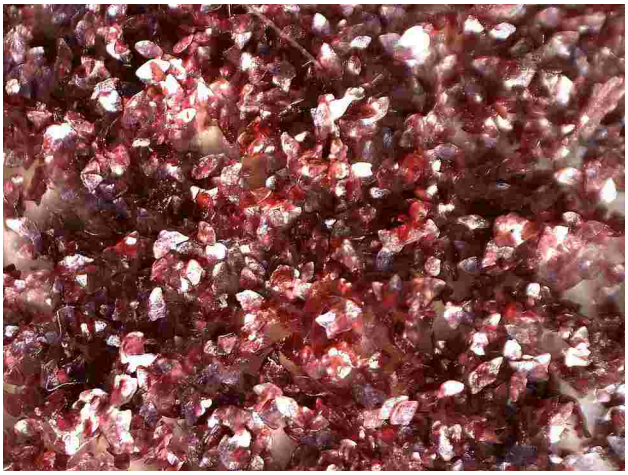


Figure 1. Cristaux de tartre du vin (crédit Lamiot, CC BY-SA 4.0 <https://creativecommons. org/licenses/by-sa/ 4.0>, via Wikimedia Commons).

une entreprise risquée, au regard des controverses qui ont touché la question des apports de Pasteur (Geison, 1995 ; Gal, 2018) à la chiralité : « *Ne touchez pas aux idoles, il vous en restera de l'or aux doigts* » (Flaubert, 1857).
Ici, nous présentons des faits historiques, notamment à ceux qui ne sont ni chimistes, ni physiciens, en espérant que les autres trouveront des informations précises, parfois nouvelles et toujours référencées, assorties de quelques extraits importants des publications de certains des contributeurs principaux à la question de ce qui est aujourd'hui nommé « chiralité » (Thomson, 1893 ; Bentley, 1995). Le parti a été pris de donner les avancées dans l'ordre chronologique, afin de montrer les alternances en chimie et en physique ; un tableau synthétique des travaux est donné, et l'on arrête l'histoire avec les discussions relatives à la découverte de l'acide tartrique « méso ».
Dans tout le texte, les terminologies périmées, quand elles sont discutées de textes anciens, tout comme les terminologies anciennes ou communes quand elles sont ambiguës, sont signalées par des guillemets. La totalité des extraits les plus longs est donnée en « Matériels supplémentaires ».

Les débuts de la chimie du « tartre du vin »

Le dépôt cristallin qui se forme dans les tonneaux de vin (du latin *tartarum*, qui signifie « dépôt ») était déjà étudié par les alchimistes du Moyen Âge (Delépine, 1935 ; Pobeguin, 1949 ; Hulliger, 1994) (figure 1) : par des recristallisations successives dans l'eau, ils en extrayaient une matière blanche, nommée « crème de tartre », ou « pierre de vin », ou encore « tartre du vin », qu'ils savaient distinguer du « tartre » plus courant qu'est le carbonate de calcium, déposé notamment dans les canalisations (Manzola et Ben Amor, 2001).
Les opérations de recristallisation effectuées jadis par les alchimistes restent pratiquées dans les laboratoires de chimie modernes (Baumé, 1763 ; Bohm, 1985), parce qu'elles permettent de purifier des composés, les molécules ou ions s'empilant régulièrement sur les germes, ce qui exclut souvent des molécules ou ions d'autres nature (on verra plus loin combien cette observation apparemment anodine fut essentielle pour les travaux de dédoublement des tartrates). Aujourd'hui encore, tous les chimistes apprennent, au cours de leurs études, à produire des monocristaux de grande taille, réguliers, par des cristallisations lentes, que celle-ci résultent d'un chauffage suivi d'un lent refroidissement ou qu'elles soient la conséquence d'une lente évaporation. La compétence est si essentielle que, par exemple, une compétition de croissance de monocristaux est organisée annuellement par l'Institut de chimie du Canada (Institut de chimie du Canada, 2019).
Certaines cristallisations s'obtiennent par chauffage d'une solution (avec un solvant, et des solutés, parmi lesquels le composé d'intérêt), puis d'un refroidissement : on se fonde alors sur la propriété du composé d'intérêt d'être plus soluble dans le solvant liquide chaud que dans le même solvant froid : le mouvement des molécules en phase liquide étant plus rapide à haute température, les molécules du soluté en solution dans le solvant chaud ont une énergie supérieure à l'énergie d'association à un germe

solide, de sorte qu'elles restent en solution. Lors du refroidissement de la solution, l'énergie (notamment cinétique) des molécules du solvant et du soluté diminue, de sorte que, quand l'énergie des molécules de soluté devient inférieure à l'énergie d'association à la surface du solide, les molécules de soluté se disposent aux positions énergétiquement favorables de la surface des cristaux et font croître ces derniers, les impuretés restant exclues, en solution (Gibbs, 1906 ; Kelton et Greer, 2010 ; Tipeev *et al.*, 2018). On les élimine avec la solution mère par une simple filtration, qui retient les cristaux du soluté d'intérêt (dans cette dernière description, on a évoqué des molécules, mais l'idée vaut aussi pour des ions).

La mise en œuvre de la cristallisation nécessite du soin, de l'observation, de l'imagination, de l'habileté, de l'expérience (CU Boulder, 2021). Par exemple, l'ajout de solvant chaud gagne à être limité à la solubilisation du solide à purifier. En outre, si l'on refroidit trop vite, des impuretés subsistent entre les nombreux petits cristaux formés ; or, de petits cristaux ayant un rapport surface sur volume supérieur à celui de gros cristaux, des impuretés localisées à la surface des cristaux seront nombreuses à être piégées dans la masse cristallisée quand le refroidissement sera trop rapide. Sans compter que l'on forme alors de nombreux petits cristaux, plus difficiles à étudier, au lieu de former les gros cristaux réguliers visés.

Une autre technique classique de cristallisation est l'évaporation, libre ou ralentie. Cette technique, qui est proposée dans des « boîtes de petit chimiste » (Sentosphère, 2021) et, aussi, lors de séances de travaux pratiques de l'enseignement secondaire ou supérieur (Académie de Reims, 2014), consiste à coller un petit monocristal au bout d'un fil qui trempe dans une solution que l'on fait évaporer lentement (Hulliger, 1994) ; la concentration en composé d'intérêt dans la solution, quand elle augmente en raison de l'évaporation du solvant, conduit au dépôt des molécules du soluté sur le cristal en croissance. On peut améliorer cette technique élémentaire en plaçant le récipient qui contient la solution du composé à cristalliser dans un récipient plus grand, fermé, de sorte que le solvant s'évapore plus lentement du récipient interne, après avoir saturé l'air au-dessus de la solution de cristallisation, ce qui favorise la formation de gros monocristaux (Mullin, 2001).

Pour en revenir au tartre du vin, il est utile d'indiquer que, le plus souvent, il est principalement fait de cristaux d'un composé qui est couramment nommé (+)-hydrogénotartrate de potassium, ou encore bitartrate de potassium, ou tartrate de monopotassium (Jungnickel et McCormmach, 1996), mais que les règles de l'Union internationale de chimie pure et appliquée (UICPA en français, IUPAC en anglais) recommandent plutôt de nommer sans ambiguïté (2R, 3R)-dihydroxybutanedioate de potassium ; le nom (+) tartrate de potassium reste couramment utilisé (Cross et Klyne, 1976) (figure 2).

Toutefois on sait aujourd'hui que le tartre du vin a une composition qui varie selon les conditions de température et d'acidité : le (+) tartrate de potassium est mêlé à plus ou moins d'hydrogénocarbonate de calcium et - nous le verrons plus loin - à d'autres composés qui étaient jadis confondus avec lui.

Les études du tartre du vin conduisirent à la découverte d'un sel analogue, le « tartrate double de sodium et de potassium » par le pharmacien Élie Seignette (1632–1698), entre 1648 et 1663. Aujourd'hui surnommé sel de Seignette ou sel de Rochelle, ce composé fut étudié par le chimiste berlinois Andreas Sigismund Marggraf (1709-1782), en 1764, alors qu'il cherchait des différences entre les bases (ou alcalis) et les sels, distinguant la soude (hydroxyde de sodium) et la potasse (hydroxyde de potassium), comprenant que le chlorure de sodium (qui forme l'essentiel du sel de table) peut s'obtenir par réaction d'acide chlorhydrique et d'hydroxyde de sodium, observant que les composés qui contiennent du potassium colorent une flamme en bleu-violet, alors que la présence de sodium conduit à une flamme jaune. Au cours de ces études, Marggraf explora aussi le tartre du vin, qui,

malgré sa réputation d'être acide, semblait aussi être une base (Lenartsson, 2020).
Auparavant Stephen Hales (1677-1761) avait obtenu de l'« air fixé » (du dioxyde de carbone) en faisant réagir des acides avec du « tartre » (Thorpe, 2015, 2021) : un tiers de la masse du tartre était perdue sous forme gazeuse. Ce « tartre » était le carbonate de potassium, et non celui du vin, fait de tartrates, mais les travaux de Hales conduisirent le chimiste britannique Henry Cavendish (1731-1810) à chercher la quantité de base (« alcali ») dans le « tartre soluble » (le tartre du vin) (Partington, 1951), puis Marggraf à ajouter de la chaux (hydroxyde de calcium) au tartre du vin, produisant un composé nouveau (Marggraf, 1762 ; Szabadváry, 1966) : le « tartrate de calcium ».
En 1769, l'étude du tartre du vin fut prolongée par le chimiste suédois Carl Wilhelm Scheele (1742-1786), qui fit agir de l'acide sulfurique sur le produit obtenu par Marggraf, produisant un acide qu'il nomma *acidum tartari*, ou « acide tartrique ». Dès 1771, le pharmacien Hilaire Marin Rouelle, dit Rouelle le Cadet (1718-1779), fit usage de cet acide comme médicament et - surtout - pour fixer la couleur des textiles (Nicolle, 1969). D'où la création de sociétés qui produisirent cet acide : nous verrons plus loin comment cette activité industrielle conduisit à la découverte de ce que nous nommons aujourd'hui la « chiralité ».
À ce stade du texte, il devient nécessaire de confronter la terminologie d'« acide tartrique » aux données actuelles : la chimie moderne a appris que trois composés différents ont la même formule brute $C_4H_6O_6$ (on parle aussi de formule élémentaire, puisqu'elle n'indique que les proportions des divers éléments) et la même formule semi-développée HOOC-CHOH-CHOH-COOH (les lettres C, H, O désignent respectivement des atomes de carbone, d'hydrogène et d'oxygène). Jadis ces trois composés différents étaient tous indistinctement nommés « acide tartrique », mais, comme indiqué rapidement plus haut, si ce terme reste utilisé, la base du nom internationalement reconnu est « acide 2, 3-dihydroxy-butanedioïque ». Pour distinguer les trois composés qui ont la même

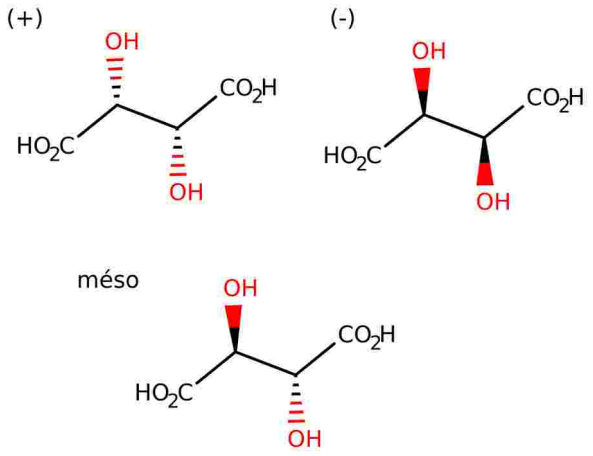


Figure 2. Les trois acides tartriques. Les liaisons chimiques représentées par de simples barres sont dans le plan du dessin ; les liaisons en gras pointent vers l'avant, et les liaisons en pointillés sont vers l'arrière (Juvin et al.*, 2021). L'établissement de telles formules a notamment nécessité de comprendre que les atomes de carbone étaient « tétravalents », à savoir qu'ils pouvaient établir des liaisons avec quatre atomes voisins, formant des structures tétraédriques. Grâce à ce travail d'August Kekule, puis de ses élèves James Dewar, Wilhelm Körner, Joseph Le Bel et Jacobus Henricus Van't Hoff, les chimistes purent comprendre - bien après le travail de Louis Pasteur sur les acides tartriques et les tartrates - que si les quatre substituants d'un atome de carbone sont tous différents, alors l'assemblage tétraédrique n'est pas superposable à son image dans un miroir. C'est ce qui explique notamment que deux des trois acides tartriques soient images l'un de l'autre dans un miroir (crédit H. This).*

formule élémentaire ou semi-développée, et qui étaient jadis confondus, on doit ajouter des précisions : deux d'entre eux, qui sont images l'un de l'autre dans un miroir (comme une main gauche est l'image de la main droite par réflexion), sont désignés par les préfixes

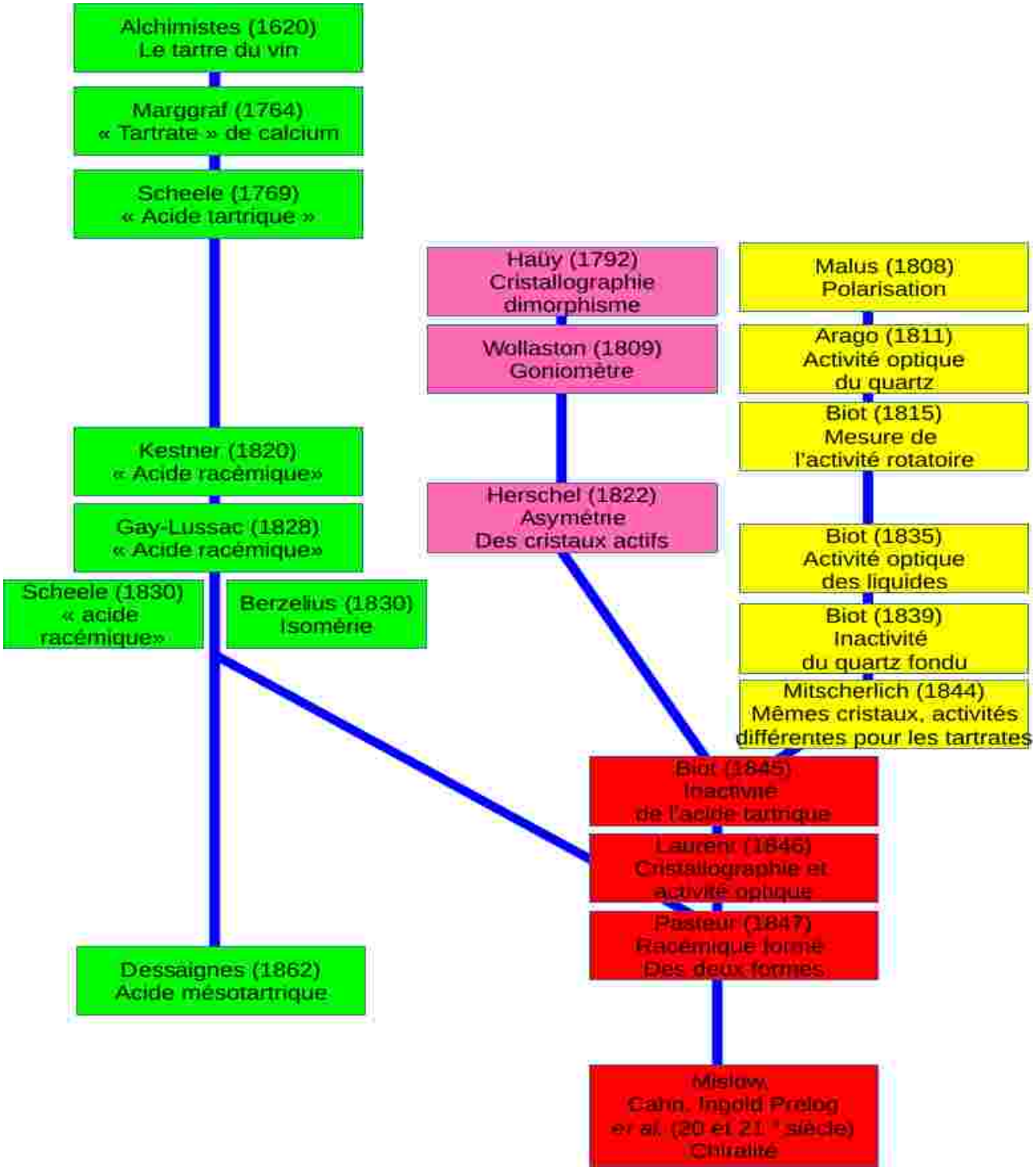


Figure 3. Arbre des développements scientifiques principaux qui ont conduit à la découverte de la chiralité. Nombre de travaux sont omis, tels ceux de Henri Braconnot (1780-1855), de Justus Liebig (1803-1873), de Jean-Baptiste Dumas (1800-1884) ou d'Edmond Frémy (1814-1894), sur les transformations de l'acide tartrique au cours du chauffage (Frémy, 1838) (crédit H. This).

respectifs (2R, 3R)-(+) et (2S, 3S)-(-) (Cross et Klyne, 1976), et le troisième (2R, 3S), qui correspond à une répartition différente des atomes dans l'espace, est nommé méso (figure 2). Dans la suite de ce texte, nous utilisons respectivement les désignations (+) et (-) au lieu de (2R, 3R)-(+) et (2S, 3S)-(-), par simplicité.

Cristaux et lumière

Alors que les chimistes exploraient ainsi le tartre du vin et ses dérivés, les physiciens forgeaient progressivement les méthodes de caractérisation des cristaux et des composés en solution. Il y eut deux types de développements parallèles : la cristallographie, et l'étude de la lumière polarisée (figure 3).

Ainsi, en 1792, René Just Haüy (1743-1822), pionnier de la cristallographie, avait commencé une série d'études, après avoir observé qu'un cristal rhomboédrique cassé laissait apparaître un cristal rhomboédrique plus petit, et il en était venu à proposer que les cristaux soient formés par la juxtaposition de petites unités toutes identiques, qu'il avait nommées « molécules intégrantes », des particules minuscules qui auraient eu une composition chimique fixe et une forme géométrique caractéristique, dite « primitive » (Haüy, 1792, 1801, 1808, 1809 ; Dolomieu, 1801 ; Kunz, 1918 ; Kubinga, 2012) :

« *Or, la division du crystal en petits solides similaires a un terme, passé lequel on arriveroit à des particules si petites, qu'on ne pourroit plus les diviser, sans les analyser, c'est-à-dire, sans détruire la nature de la substance. Et je m'arrête à ce terme et je donne à ces corpuscules que nous isolerions si nos organes ou nos instrumens étoient assez délicats, le nom de '' molécules intégrantes ''. Il est très probable que ces molécules sont les mêmes qui étoient suspendues dans le fluide où s'est opéré la crystallisation* » (Haüy, 1792).

On observera ici la terminologie «molécules intégrantes », et non l'expression « cellules intégrantes » qui apparaît dans certains commentaires historiques, mais ne figure pas dans les deux textes les plus anciens de Haüy.

Ce dernier avait également découvert que la même composition chimique élémentaire pouvait conduire à des formes cristallines différentes, et il avait introduit le terme de « dimorphisme », pour désigner cette situation. Le carbonate de calcium fut le premier exemple de composé présentant un dimorphisme, apparaissant sous forme d'aragonite ou sous forme de calcite. Selon Haüy, deux cristaux ayant la même composition chimique et la même structure en termes de « molécules intégrantes » n'auraient pu qu'avoir une forme cristalline unique. Toutefois Haüy avait identifié des exceptions à sa règle : quelques cristaux de quartz présentaient des faces plus inclinées que d'autres, et il avait nommé « plagièdres » ces cristaux asymétriques, les subdivisant en « gauches » et « droits » selon l'orientation des faces.

En 1808, Etienne-Louis Malus (1775-1812) découvrit que la lumière réfléchie contracte de nouvelles propriétés qui la distinguent de la lumière que transmettent les corps lumineux (Arago, 1859 ; Kahr, 2018). Selon François Arago (1786-1853), la découverte eut lieu rue d'Enfer, à Paris : Étienne Louis Malus regardait les rayons du Soleil réfléchis par les fenêtres du palais du Luxembourg à travers un cristal biréfringent, et au lieu de voir les deux images brillantes qu'il attendait, il n'en perçut qu'une. Étonné, il comprit qu'il y avait là un phénomène différent de la biréfringence, découverte par le Danois Rasmus Bartholin en 1669 (Bartholin, 1669). Ce même jour, Malus, utilisant la lumière d'une bougie, parvint à établir ce qui a été nommé « loi de Malus », laquelle stipule que l'intensité d'une lumière polarisée linéairement varie, après la traversée d'un analyseur linéaire, comme le carré du cosinus de l'angle entre la direction de polarisation et la direction de l'analyseur. Il nomma « polarisation » la modification que la lumière subit au cours de la réflexion (Malus, 1808). On verra que Pasteur fut en quelque sorte le petit-fils scientifique de Malus, Jean-Baptiste Biot (1774-1862) en ayant été le fils.

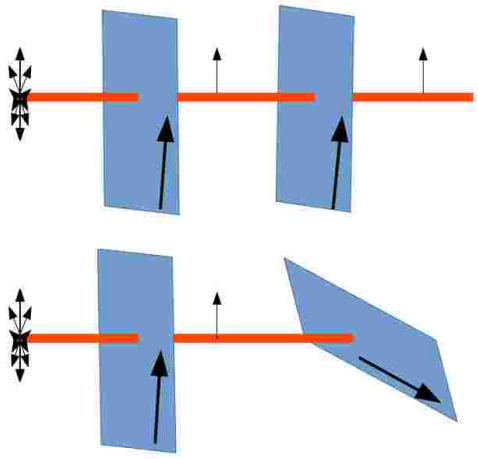


Figure 4. La lumière naturelle (faisceau rouge) n'est pas polarisée. Quand elle traverse un filtre polarisant (premier parallélogramme bleu en haut à gauche), la lumière filtrée est polarisée (flèche noire). Si cette lumière atteint un second filtre polarisant de même direction que le premier (second parallélogramme en haut à droite), elle en sort sans modification (dans un cas idéal sans absorption). En revanche, quand la lumière initialement polarisée atteint un filtre polarisant perpendiculaire au premier (en bas à droite), alors aucune lumière n'est transmise (crédit H. This).

Pour la compréhension de ce qui suit, il est utile de signaler que la lumière peut être décrite par la vibration d'un champ électrique et d'un champ magnétique perpendiculaires entre eux, et tous deux perpendiculaires à la direction de propagation de la lumière. Quand cette dernière traverse un filtre dit polarisant, la direction du champ électrique (par exemple) devient fixe. Quand on dirige cette lumière polarisée sur un filtre polariseur perpendiculaire au premier, elle ne le traverse pas ; mais si on interpose, entre les deux filtres ainsi croisés, un matériau qui fait tourner la polarisation de la lumière d'un certain angle, alors il faut tourner le second filtre d'un angle différent de 90 degrés pour bloquer toute la lumière (figure 4).

En 1809, les études de cristallographie furent facilitées quand, grâce à des progrès dans la fabrication des lentilles, des miroirs et de la mécanique, le physico-chimiste britannique William Hyde Wollaston (1766-1828) mit au point le goniomètre à réflexion (Mascarenhas, 2020 ; Usselman, 2021) : cet instrument permet des mesures d'angles précises de l'inclinaison des facettes des cristaux, même pour de petits échantillons, en utilisant ces facettes comme miroir. Pour les mesures, un cristal était initialement immobilisé par de la cire sur un berceau monté sur un axe, cet axe étant lié à un disque d'un cercle gradué en degrés et équipé d'un vernier, pour plus de précision. Après avoir ajusté l'orientation du cristal pour que de la lumière soit réfléchie par une de ses faces, on positionne le cercle à zéro, puis on fait tourner le montage jusqu'à observer la réflexion sur l'autre face. On mesure ainsi des angles à la minute d'angle près (Turner, 1998). Plus tard, les cristaux furent placés entre deux pointes que l'on pouvait rapprocher à l'aide d'une vis micrométrique (figure 5).

En 1811, ce sont à nouveau les études de la polarisation de la lumière qui progressent : Arago découvre ce que l'on nomme aujourd'hui la « polarisation rotatoire », ou l'« activité optique », du quartz cristallin (Arago, 1811 ; Arago, 1865 ; Rosmorduc, 1984 ; Ruchon, 2005), alors qu'il s'intéresse initialement aux couleurs des lames minces, sujet initialement étudié au 17e siècle par les physiciens Robert Boyle (1627-1691), Robert Hooke (1635-1703) et Isaac Newton (1642-1726), puis repris en 1802 par Thomas Young (1773-1829), et en 1807 par John Frederick William Herschel (1782-1871). Il utilise divers matériaux transparents, s'employant à retrouver « l'échelle des teintes » décrite par Newton. Au cours de son étude, il rencontre des effets différents de ceux qu'il avait observés précédemment et qu'il englobe dans un premier temps sous l'appellation de « polarisation colorée » (Arago, 1817). Plus précisément, il constate deux effets différents : l'un avec une plaque de talc de Moscovie ; l'autre avec une plaque de quartz « coupée

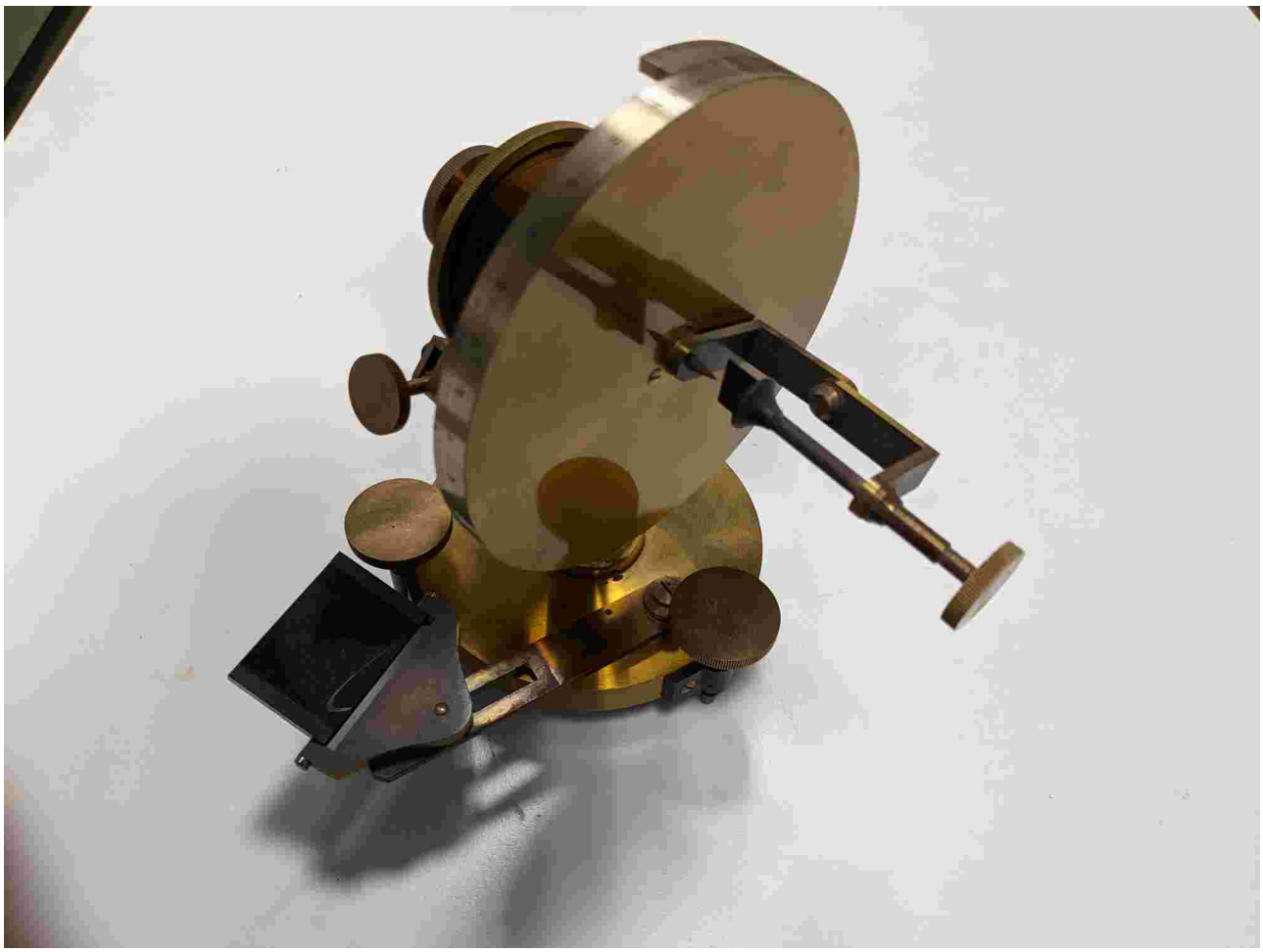


Figure 5. Goniomètre plus perfectionné que l'instrument initial de Wollaston : les cristaux sont placés entre les deux pointes à droite du disque. On compare la lumière qui arrive sur une face supérieure d'un cristal à la lumière qui vient du miroir noir en bas à gauche (crédit H. This).

perpendiculairement aux arêtes du prisme hexaèdre », c'est-à-dire perpendiculairement à l'axe optique, comme on le dira ultérieurement. Le premier effet sera ensuite nommé « polarisation chromatique », le second - qui nous intéresse ici - « polarisation rotatoire ».

Arago montre expérimentalement que l'apparition des deux phénomènes est due à l'utilisation de la « lumière du ciel bleu » qu'il avait auparavant découverte être partiellement polarisée, contrairement à celle que diffuse un ciel couvert. Sa technique était la suivante : la lumière polarisée traversait la plaque de quartz, puis elle était analysée à l'aide d'une lunette à prisme introduite par Alexis-Marie Rochon (1741-1817). Il obtenait deux images colorées, les deux couleurs étant complémentaires :

« *La couleur de chaque image ne varie pas quand on fait tourner la plaque de quartz dans son plan. Quand on tourne l'analyseur de 18 ° dans un certain sens, l'une des images, qui était d'abord rouge, par exemple, devient successivement orangée, jaune, jaune verdâtre, vert bleuâtre, violacée et enfin rouge ; l'autre image reste toujours complémentaire sans qu'aucune d'elle passe jamais par une teinte neutre* » (Mascart, 1891).

Arago interprète qu'à chaque couleur

Figure 6. Jean-Baptiste Biot (1774-1862).

correspondrait une catégorie de « molécules de lumière » : on voit ici combien l'emploi du mot « molécule » était peu fixé, à l'époque, différant considérablement de l'acception de Haüy et de Dolomieu. La traversée du quartz entraînerait une rotation des axes de ces « molécules », rotation différant avec la couleur, d'où la dispersion observée (Arago, 1811).

Jean-Baptiste Biot (1774-1862) fut immédiatement intéressé par la découverte d'Arago, et il se lança dans l'exploration des lois de la « polarisation rotatoire », et cela jusqu'à sa mort en 1862 (figure 6).

Tout d'abord, il mit au point, pour le suivi de la rotation de la polarisation de la lumière à travers les cristaux (Biot, 1811), un montage qu'il conserva ensuite à quelques améliorations près (figure 7). Le polariseur était un miroir d'obsidienne, adapté sur une monture à l'une des extrémités d'un tube métallique (destiné à éviter des lumières parasites). Son inclinaison sur l'axe du tube était réglable à l'aide d'un petit cercle, polarisant rectilignement le rayon réfléchi, dirigé suivant cet axe. L'autre extrémité du tube portait une monture semblable à la précédente. Sa rotation était repérée par un index sur un cercle gradué. De plus, cette monture portait un disque annulaire, inclinable d'un angle connu autour d'une perpendiculaire à l'axe du tube. C'est sur cet anneau que se fixait la lame cristalline à étudier.

Si Biot a toujours conservé le miroir comme dispositif polariseur, il a employé successivement différents analyseurs : un miroir dans son premier montage de 1811, puis un prisme de spath d'Islande (un carbonate de calcium), puis différents types de prismes biréfringents. Il en est de même de ses contemporains, mais, après 1828, le prisme introduit par le physicien anglais William Nicol (1770-1851) a été de plus en plus fréquemment utilisé, tant comme polariseur que comme analyseur.

Les créateurs de la cristallographie avaient considéré la biréfringence optique comme une particularité de certains cristaux, mais ils n'avaient pas établi de rapport entre cette propriété et la structure des matériaux concernés (Metzger, 1969). Biot, lui, s'intéressa attentivement au sujet, considérant que « *ces phénomènes, lorsqu'ils se manifestent dans les corps solides avec les caractères de continuité qui leur sont propres, attestent l'existence d'un mode d'arrangement pareillement continu et fixe ; en un mot ils décèlent un système cristallin intérieur ; ils peuvent, en conséquence, servir pour constater cet état des corps* » (Biot, 1816).

C'est porté par cette hypothèse sur la constitution de la matière qu'il découvre que la polarisation change quand la lumière traverse certains liquides organiques, tels l'essence de térébenthine, « l'huile essentielle de laurier », « l'huile essentielle de citron » ou le camphre en solution dans l'éthanol (Biot, 1815 ; Thomson, 1904). Pour explorer le phénomène, il modifie le tube métallique qui évitait les lumières parasites dans son premier montage, afin d'y mettre le liquide à analyser. En 1818, Thomas Johann

Figure 7. Un polarimètre à prisme pour l'étude des liquides. L'observateur regarde, dans l'oculaire à gauche de l'appareil, la lumière qui est polarisée par l'objectif à droite. Le cylindre central (placé dans un berceau) contient la solution à analyser. On tourne un filtre polarisant solidaire du disque (gradué) jusqu'à ce que plus aucune lumière n'arrive à l'œil (crédit H. This).

Seebeck (1770-1831) retrouve le phénomène pour des solutions de sucres (Frankel, 1976), tandis que, cette même année, Biot met en évidence l'existence de deux sortes de quartz, l'une qui provoque une rotation de « l'axe de polarisation » de la lumière vers la droite, l'autre vers la gauche (Biot, 1818). Il pense que les effets rotatoires du quartz traduisent des caractéristiques de sa constitution, mais l'activité optique de certains liquides et, notamment, de certaines solutions lui font supposer que, dans ce cas, la propriété était d'origine « moléculaire ». Le phénomène, écrivit-il, est dû à « *une faculté propre à ces molécules indépendamment de leur état d'agrégation* » (Biot, 1817).

La question des molécules, des atomes, des corpuscules, des particules

Dans le texte de Biot (1817), on retrouve donc le mot « molécule », que nous avons vu utilisé plusieurs fois et dont l'acception changeante, au cours des temps, complique la compréhension des progrès de la chimie. Il faut insister, pour bien dire que le concept de « molécule » n'avait pas initialement, et notamment pour Biot, la signification que nous lui donnons aujourd'hui (Fleck, 1963 ; Mauskopf, 1976 ; Fernandez, 2009 ; Banchetti-Robino, 2013). Les contemporains de Biot utilisaient indifféremment les mots « molécule », « corpuscule », « particule ». Le mot « atome », lui, révélait souvent l'adhésion à la théorie atomique de John Dalton (1766-1844), alors controversée parce que spéculative. En effet, après la transformation de la chimie en une science moderne, quantitative, principalement par Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794), les chimistes avaient découvert des « lois » (lois des « proportions définies » et des « proportions multiples »), fondées sur la constance des proportions des « corps simples » contenus dans les « composés chimiques ». Par exemple, quelle que soit la masse d'eau considérée, le rapport entre la masse d'hydrogène et la masse d'oxygène entrant dans la composition de l'eau est toujours de 1 pour 8.

En modernisant l'antique théorie « atomique » des Grecs Leucippe et Démocrite, Dalton avait donné à la chimie une base dont un élément essentiel était une liste de « poids atomiques » (Fleck, 1963). Toutefois ces poids ne pouvaient être, à cette époque, connus que par leurs rapports, car on ne disposait alors d'aucune expérience donnant un ordre de grandeur des véritables poids atomiques. Il y avait même souvent des hésitations à propos de ces rapports, et, par exemple, les valeurs données par Dalton pour les corps que nous nommons « divalents » étaient souvent la moitié des valeurs connues aujourd'hui : par exemple, avec H = 1, on avait O = 8 (aujourd'hui, pour une masse de 18 grammes d'eau, on sait qu'il y a 2 grammes d'hydrogène et 16 grammes d'oxygène, la formule H_2O reconnaissant que la molécule d'eau comporte deux atomes d'hydrogène pour un atome d'oxygène). C'est à la suite des travaux de Louis-Joseph Gay-Lussac (1778-1850) sur les combinaisons gazeuses, et après de nombreuses études et débats, que les chimistes arrivèrent finalement à préciser les notions d'atome et de molécule telles qu'on les emploie maintenant, fondées sur la notation atomique, mais, notamment en 1848, quand Louis Pasteur dédoubla l'acide tartrique racémique, la théorie atomique était peu acceptée des chimistes (Fleck, 1963 ; Gal, 2017).

Le physicien britannique Oliver Lodge (1851-1940) a témoigné en 1912, soit 64 ans après le travail de Pasteur sur les tartrates (traduction personnelle) : « *Bien que les chimistes aient essayé de se représenter le type d'arrangements ou de groupes d'atomes qui permettraient de rendre compte des propriétés des molécules - notamment leur organisation dans les cristaux et l'inclinaison des faces de ces derniers -, ces mêmes chimistes ont toujours eu la prudence de dire que ces dessins étaient seulement des représentations qui ne devaient pas être considérées littéralement et qui ne correspondaient pas à la réalité ; il fallait les prendre plus ou moins métaphoriquement, d'une manière allégorique, plutôt que comme des données réelles. En fait, on doutait généralement que les arrangements puissent être jamais perçus, et il y avait beaucoup de scepticisme, au moins chez quelques chimistes, à propos de ce que les '' atomes de matière '' puissent être autre chose qu'une expression utile* » (Lodge, 1912 ; Fleck, 1963).

Pour mieux interpréter les termes d'atome et de molécule, au 19e siècle, il est bon de rappeler que les idées prévalentes sur la structure des « molécules » dans les cristaux dérivaient parfois de l'école d'Adrien-Marie Ampère (1775-1836) qui voyait les « molécules » comme des polyèdres réguliers convexes. Mauskopf (1976) a établi que, au plus fort de son influence, la vision d'Ampère n'a été soutenue que par un petit groupe de scientifiques enclins à la spéculation, sans influence en dehors de ce

cercle restreint. On connaissait des composés qui avaient la même composition élémentaire (en termes d'éléments chimiques, donc) et des propriétés chimiques et physiques différentes (des « isomères »), mais on n'avait pas de théorie pour expliquer ce phénomène.

Insistons pour bien montrer que l'on ne doit pas lire le mot « molécule » des textes du 19e siècle avec notre acception actuelle, car nous verrons combien il faut éviter de penser que Pasteur fut prescient à propos de chiralité : en 1849, soit un an après le travail de Pasteur qui marquera la fin de l'histoire considérée ici en détails, le physicien écossais William Rankine (1820-1872) avait proposé l'hypothèse de « tourbillons moléculaires », qui auraient été des noyaux entourés d'atmosphères élastiques. Toutefois le modèle présentait des défauts, et la présence de l'atmosphère élastique autour des noyaux était arbitraire. Puis, en 1867, William Thomson (1824-1907 ; il est également connu sous le nom de Lord Kelvin, qu'il prit quand il fut anobli en 1866) proposa que le « vrai atome » soit un tourbillon dans un liquide parfait, ce dernier étant l' « éther », un fluide qui aurait empli l'espace et dont l'existence fut supposée jusqu'aux réfutations expérimentales de la fin du 19e siècle (Michelson et Morley, 1887). Il associait ainsi la discontinuité de la matière à une certaine continuité. Cette théorie fut bien reçue dans le milieu scientifique, mais Fleck (1963) ne parvient pas à savoir si ce fut en raison d'une valeur reconnue de la théorie ou en raison de l'influence scientifique de Thomson.

En tout cas, à l'époque des études des acides tartriques par Biot, Laurent et Pasteur, la nature des composés organiques était mystérieuse (Gal, 2018). La compréhension moderne de la structure de la matière n'a commencé à s'introduire qu'après la diffusion des travaux d'Amedeo Avogadro (1776-1856) par Stanislao Cannizaro (1826-1910), lors du congrès international que Friedrich August Kekulé (1829-1896), Charles Adolphe Würtz (1817-1884) et Karl Weltzien (1813-1870) organisèrent à Karlsruhe, en 1860 : Cannizaro distribua des copies du résumé du cours de chimie qu'il enseignait à l'université de Gênes et qui avait paru dans la revue italienne *Il Nuovo Cimento* en 1858. Il y reprenait la théorie atomique introduite par Dalton, modifiée par Avogadro, et il montrait qu'elle permettait de rendre compte de tous les résultats de la chimie de façon cohérente (Compain, 1992) ; tous ne furent pas convaincus, mais l'impulsion était largement donnée.

À l'étranger, la notation atomique était couramment employée, mais, en France, il y eut de longues polémiques avant que triomphe finalement la notation atomique, notamment parce que Marcellin Berthelot (1827-1907), qui était un mandarin établi à la fois scientifiquement, intellectuellement et politiquement, y était très opposé : pendant des années, l'enseignement de la chimie et les publications de chimie continuèrent à faire usage de la notation « équivalentaire » (par exemple, on notait l'eau « OH », au lieu de « H_2O »), à côté de la notation « atomique », qui s'imposait lentement (Jacques, 1987). En France, la notation atomique avait été notamment adoptée par Würtz, Charles Friedel (1832-1899), Édouard Grimaux (1835-1900), Paul Schützenberger (1829-1897), par exemple, tandis que la notation en équivalents était préconisée par Berthelot, Henri Sainte-Claire Deville (1818-1881), Émile Jungfleisch (1839-1916) et d'autres. Les jeunes chimistes étaient partagés, tel Marcel Delépine (1871-1965), qui a ainsi témoigné : « *A titre de souvenir personnel, je me rappelle que lors d'un concours, en 1893* [45 ans après le dédoublement de l'acide tartrique racémique], *dans une composition sur les dérivés salicyliques, question sans doute posée par Jungfleisch, je pris la précaution d'employer les deux notations (que je connaissais parfaitement) dans la crainte d'indisposer Jungfleisch en me servant seulement de la notation atomique. Lors de ma licence, à la Sorbonne, en 1890-1891, la chimie minérale était enseignée en notation équivalentaire par Troost, Ditte, Joly, et la chimie organique en notation atomique par Friedel et Salet* » (Metz, 1963).

Biot, puis Herschel

Alors que l'on était ainsi loin du succès de la théorie atomique et de la compréhension moderne de la structure des molécules, Biot montra expérimentalement que, dans un mélange de plusieurs solutions optiquement actives, la rotation de la polarisation dépend, d'une part, des concentrations respectives en différentes « substances » dissoutes, et, d'autre part, de leur pouvoir rotatoire propre (Biot, 1817), ce qui, selon lui, achevait « *de prouver que la faculté de faire tourner les axes de polarisation appartient aux particules mêmes des substances qui en jouissent* ». À noter qu'il en viendra ultérieurement, à partir de ce type d'expériences, à définir ce qu'il nommera le « pouvoir rotatoire moléculaire » des corps (Biot, 1838a), avec, on le répète, une idée des « molécules » très différente de la nôtre.
En attendant, il vérifie, pour l'essence de térébenthine, que la propriété existe encore quand le produit est à l'état de vapeur (le montage finit par exploser, déclenchant un incendie des laboratoires). Et Biot de conclure :
« *Cette dernière et importante expérience, en confirmant toutes les indications que nous avons tirées des précédentes, achève de montrer que le singulier pouvoir que certaines substances possèdent de faire tourner les axes de polarisation des rayons lumineux est une faculté individuelle à leurs particules* [et non « molécules »] *; faculté qu'elles ne peuvent perdre que lorsqu'elles cessent d'être elles-mêmes, par leur décomposition* » (Biot, 1817).
Trois ans plus tard, les études des cristaux apportèrent une nouvelle information importante pour l'étude de la matière. Examinant avec soin des cristaux de quartz, Herschel découvre l'existence de facettes qui sont différemment disposées selon les cristaux : inclinées tantôt d'un côté, tantôt du côté opposé, et de leur direction dépend le sens du pouvoir rotatoire des cristaux. Si ces facettes, nommées « plagièdres » par Haüy, sont inclinées vers la droite, le cristal est généralement dextrogyre (il fait tourner la polarisation de la lumière vers la droite), et vice versa (Herschel, 1822). Herschel reprend la terminologie du cristallographe allemand Christian Weiss (1780-1856), qui parlait d'« hémiédrie » plutôt que de la plagiédrie, comme l'avait fait Haüy.
Même si Biot a ultérieurement montré que la règle esquissée par Herschel souffre d'exceptions, elle a marqué une étape importante de l'étude du problème de l'« acide tartrique ». La question a été reprise par la suite par Gabriel Delafosse (1796-1878), élève de Biot, et par plusieurs autres physiciens (Verdet, 1869). Dès cette époque, on faisait une relation entre polarisation rotatoire et « molécules », comme le disait Herschel :
« *Bien qu'il semble très difficile de former une hypothèse définitive pour expliquer le fait, l'impression générale que nous avions était un besoin de symétrie dans la disposition à l'intérieur* des molécules [c'est nous qui soulignons]*, de certaines des forces élémentaires par lesquelles elles agissent sur la lumière* » (Duclaux, 1896).
En 1839, quand Marc Antoine Gaudin (1804-1880) réussit à fondre du quartz, Biot montre que, dans cet état, il est optiquement inactif, ce qui amènera Pasteur à admettre ultérieurement que « *le cristal ne doit pas son hémiédrie, comme l'acide tartrique, à l'arrangement des atomes dans la molécule chimique, mais à l'arrangement des molécules physiques dans le cristal total* » (Delépine, 1935).
Ces réflexions ne concernaient que les minéraux, mais, en 1819, le chimiste allemand Eilhard Mitscherlich (1794-1863) proposa une théorie similaire pour les cristaux synthétisés chimiquement : la théorie de l'isomorphisme. Selon Mitscherlich, la ressemblance des cristaux chimiques traduisait celle de leurs « molécules » constitutives, ce qu'il exprimait par la formule « Même cristal, même chimie ». Par exemple, ayant observé que les phosphates et les arséniates d'un même métal cristallisent de la même manière, il en concluait qu'ils avaient une « structure atomique » analogue.

Le déclic alsacien

Le cours de ces études fut bouleversé par la préparation d'un nouvel « acide tartrique » par l'entreprise Kestner Père et Fils, à Thann, entre 1822 et 1824 (Rohmer, 1994). La société fabriquait des produits de qualité, comme cela fut reconnu notamment en septembre 1828 lors de la visite du roi Charles X à Mulhouse : parmi les produits choisis dans le meilleur de l'industrie haut-rhinoise, on présenta des textiles de Nicolas Schlumberger, des papiers peints de la société Züber, des locomotives d'André Koechlin, des lithographies de Godefroy Engelmann et des produits chimiques de Kestner Père et Fils. Le rapport fait sur cette exposition fut particulièrement laudatif pour la société thannoise (voir les Matériels supplémentaires 1) (Gay-Lussac, 1826 ; 1828). C'est au début des années 1820, donc, que Charles Kestner avait fait une observation qu'il avait fait connaître au monde scientifique :

« *On a remarqué* [...] *surtout en hiver, des cristaux que nous séparions avec soin parce qu'ils rendaient la cristallisation de l'acide tartrique confuse, lorsqu'ils y restaient mêlés.* »

Pasteur découvrira plus tard que cela se produisait également dans d'autres fabriques d'Allemagne, de Suisse ou d'Italie, mais seule la société alsacienne avait été intéressée par le phénomène. Intrigué par le nouvel acide, Gay-Lussac demanda des cristaux « parasites » à Kestner, les analysa, et constata qu'ils avaient les mêmes propriétés chimiques que ceux de l'« acide tartrique », mais quelques propriétés physiques différentes (grosseur, solubilité, par exemple). Il nomma la nouvelle substance « acide racémique » en 1828, du latin *racemus*, « grappe de raisin ».

En 1830, Scheele établit la formule élémentaire de l'« acide tartrique » ($C_4H_6O_6$), et, la même année, le chimiste suédois Jöns Jacob Berzelius (1779-1848) montra que les compositions élémentaires de l'« acide tartrique » et de l' « acide racémique » étaient identiques, ce qui contribua à sa formulation du concept d'« isomérie » : deux composés sont isomères s'ils ont la même composition chimique, mais des propriétés différentes (Nicolle, 1969). Berzelius changea à cette occasion l'appellation du second produit pour « acide paratartrique » (le nom « acide thannique » fut aussi utilisé, à cette époque).

Cette découverte intéressa Biot : le 5 novembre 1832, il lut à l'Académie des sciences le compte rendu d'un travail où il signalait l'activité optique de nombreux composés, parmi lesquels l' « acide tartrique » du raisin (Biot, 1835 ; Marbach, 1856). Selon Biot, c'est Herschel qui a découvert les propriétés rotatoires de tartrates, en l'occurrence ceux de potassium et de sodium. Biot lui-même les étudia, en 1835, ainsi que l'acide tartrique en solution qu'il reconnut être également actif et dextrogyre, de même que la plupart de ses sels, à quelques exceptions près, tels quelques sels qui sont lévogyres (le tartrate d'aluminium, par exemple) (Biot, 1835).

Puis, en 1838, Biot montra que l'« acide paratartrique » et ses sels sont inactifs sur la polarisation de la lumière (Biot, 1838b), et, en 1844, il lut à l'Académie une communication de Mitscherlich (Biot, 1844). Cette note étant centrale dans l'histoire des acides tartriques, nous en donnons ici un large extrait, en l'assortissant de commentaires entre crochets (voir la note complète en Matériels supplémentaires 2) :

« *M. Mitscherlich m'a prié de communiquer en son nom, à l'Académie le résultat d'une très-belle expérience qu'il a faite, et qu'il m'a donné les moyens de répéter* [...]. *On savait que l'acide tartrique* [ici, l'acide tartrique (+)] *possède le pouvoir rotatoire et le communique à toutes ses combinaisons salines* [...]. *L'acide paratartrique* [l'acide racémique, formé, comme on le découvrira plus tard, d'autant d'acide tartrique (+) que d'acide tartrique (-)], *au contraire, quoique ayant la même composition pondérale, ne possède pas ce pouvoir, et ne le communique à aucune de ses combinaisons salines.*

M. Mitscherlich s'est proposé d'examiner si cette opposition se maintiendrait dans des circonstances où les deux corps comparés

seraient semblables, non-seulement par la composition chimique, mais encore par la forme cristalline et les propriétés physiques. Il a trouvé ces conditions réunies, avec une remarquable identité, dans les sels doubles formés par les deux acides avec la soude et l'ammoniaque [ici apparaît une erreur que Pasteur soulignera : Mitscherlich n'a pas vu que les cristaux des formes (+) et (-) étaient différents]. *Les résultats que ces deux corps lui ont présentés sont décrits par lui-même dans la Note suivante.*

''Note de M. Mitscherlich. Le paratartrate et le tartrate (doubles) de soude et d'ammoniaque [on dirait aujourd'hui « de sodium et d'ammonium »] *ont la même composition chimique, la même forme cristalline, avec les mêmes angles* [on verra que Pasteur réfutera cette identité de forme cristalline], *le même poids spécifique, la même double réfraction, et par conséquent les mêmes angles entre les axes optiques. Dissous dans l'eau, leur réfraction est la même. Mais le tartrate dissous tourne le plan de la lumière polarisée, et le paratartrate est indifférent, comme M. Biot l'a trouvé pour toute la série de ces deux genres de sels ; mais ici la nature et le nombre des atomes, leur arrangement et leurs distances, sont les mêmes dans les deux corps comparés* [on observe ici une acception du mot « atome » qui ne peut être celle d'aujourd'hui]*.'' »*

Ayant présenté la note de Mitscherlich, Biot continue :

« J'ai répété avec soin l'expérience de M. Mitscherlich sur des échantillons cristallisés de son paratartrate qu'il m'avait remis. Une solution dosée de ce sel [...] *n'a présenté absolument aucune trace de pouvoir rotatoire.* […] *Indépendamment de l'épreuve optique* [...], *M. Mitscherlich avait désiré que l'on essayât, par les procédés chimiques, si la solution ne présenterait pas quelques indices de tartrate, qui aurait pu se former par un mouvement intestin, dans les cristaux du paratartrate, lequel était confectionné depuis plus de six mois.* […] *M. Regnault* [Henri Victor Regnault (1810-1878)] *a fait cet essai par le procédé habituel.* […] *Le paratartrate était* [...] *complètement exempt de tartrate, comme la nullité absolue de son pouvoir rotatoire en donnait d'ailleurs la preuve directe.* […] *Dans la dernière phrase de sa Note, M. Mitscherlich dit que la nature, le nombre, l'arrangement et la distance des atomes* [on sait maintenant la prudence avec laquelle on doit interpréter ce mot] *sont les mêmes dans les deux sels qu'il a comparés. Il conçoit sans doute ici ces atomes* [idem] *dans la signification habituelle que leur donnent les chimistes, comme représentés, au moins proportionnellement, par les équivalents chimiques des divers principes combinés* [voir la discussion précédente à propos de la théorie atomique]. *Les caractères d'identité qu'il leur attribue ainsi dans les deux sels sont conformes aux opinions généralement admises aujourd'hui en chimie. Mais, malgré la grande autorité que ces idées me paraissent recevoir ici de son assentiment, ou plutôt à cause de l'importance qu'elles tirent de cette autorité même, j'oserais dire, contrairement au sentiment général, que les résultats de l'analyse chimique ne peuvent donner aucune indication sur le mode d'arrangement, non plus que sur le nombre ou la distance relative des* corpuscules réellement atomiques qui constituent les corps [c'est nous qui soulignons] *parce que les conditions qu'on en infère sur ces particularités, dérivent d'une extension inexactement donnée à la notion des masses sensibles, que la chimie reconnaît comme équivalentes dans la généralité des réactions.* […] *De tels phénomènes ne donnent donc aucune notion qu'on puisse légitimement appliquer aux molécules composantes considérées isolément, en elles-mêmes, pour leur constitution propre, indépendante de leur mode d'agrégation fortuit. Ainsi, toutes les conséquences que l'on voudrait en déduire sur les qualités ou la répartition de ces molécules dans les masses sensibles, comme la généralité des chimistes le fait de nos jours, seraient absolument hypothétiques, et sans fondement même vraisemblable.* […] *Les seuls phénomènes dont l'observation et les mesures puissent être légitimement rapportées aux groupes moléculaires constituants eux-mêmes, me semblent donc, dans l'état actuel de nos connaissances, consister uniquement dans les*

déviations qu'un grand nombre de substances, toutes à la vérité d'origine organique, impriment aux plans de polarisation des rayons lumineux. […] *Lorsqu'on a observé ces phénomènes à travers des épaisseurs finies de ces substances, on peut prouver mathématiquement que le produit numérique ainsi obtenu est proportionnel à la moyenne des déviations qu'une particule moléculaire unique imprimerait au plan de polarisation du rayon lumineux pris pour type si elle était successivement placée dans toutes les positions imaginables relativement à lui. C'est ce produit que j'ai appelé le pouvoir moléculaire spécifique des corps* [ici, on voit ce mot « moléculaire », associé à « pouvoir », relatif à la rotation de la direction de polarisation de la lumière traversant une solution ; c'est dans ce sens que Pasteur pourra parler, quelques années plus tard seulement, de « dissymétrie moléculaire », et pas avec le sens moderne, rien dans ses textes des années 1850 ne permettant de penser qu'il ait eu une autre théorie]. *L'action dont il résulte étant individuelle, subsiste et s'exerce sans altération, pour l'intensité comme pour le sens, dans toutes les positions relatives que l'on peut faire prendre aux molécules constituantes des masses sensibles, à tous les intervalles que l'on peut établir entre elles en les désagrégeant ou en les mêlant avec d'autres substances inactives, et soit qu'on agite la masse qui les renferme ou qu'on la laisse en repos. Ce pouvoir, dans les substances qui le possèdent, ne peut être détruit ou modifié qu'en décomposant leurs groupes moléculaires et en rendant libres les principes qui les constituaient ou en engageant ces groupes mêmes non décomposés dans des combinaisons chimiques avec d'autres substances inactives, de manière à constituer des groupes moléculaires nouveaux.* [...] *Or il serait difficile de concevoir mécaniquement que ces molécules dissemblables, étant prises en même nombre, placées à égales distances, et arrangées de la même manière, pussent produire des systèmes matériels, de dimensions sensibles, dont la forme cristalline et les propriétés physiques soient aussi exactement pareilles que dans les deux corps ici comparés ; du moins rien ne saurait en donner l'assurance, et le contraire serait plutôt à présumer.* »

Avec cette note, on comprend qu'il n'est pas juste de dire que l'apport de Pasteur fut d'observer que la dissymétrie des cristaux résultait d'une dissymétrie au niveau « moléculaire » (Chambron et Keene, 2017) : cela était supposé bien avant lui… et cela ne renvoie pas aux molécules d'aujourd'hui ! En revanche, la question était, à ce stade : pourquoi l'« acide tartrique » et ses sels, avaient-ils une activité optique, alors que l'« acide racémique » n'en avait pas ? C'est cette question qui fut étudiée par Pasteur.

De Laurent à Pasteur

En 1846, à sa sortie de l'École normale supérieure, Pasteur étudie la chimie dans le laboratoire d'Antoine Jérôme Balard (1802-1876), et c'est Auguste Laurent (1807-1853), professeur de chimie de l'université de Bordeaux accueilli dans le laboratoire de Balard quelques mois après l'arrivée de Pasteur (de la fin 1846 à avril 1847) (Flack, 2009), qui le dirige, l'intéressant à l'étude des cristaux en relation avec la chimie, et, notamment, l'isomorphisme. Pasteur a lui-même écrit :

« [M. Laurent] *me fit voir au microscope que ce sel* [tungstate de sodium parfaitement cristallisé] *en apparence très pur, était un mélange de trois espèces de cristaux distincts, qu'un peu d'habitude des formes cristallines permettait de reconnaître sans peine* » (Geison, 1995 ; Dri, 1999).

Pasteur est conscient de sa chance, au point qu'il écrit à son ami Charles Chappuis (1822-1897) (Dri, 1999) :

« *Quand il arriverait que ce travail ne mènerait à aucun résultat utile à publier, tu penses que j'y gagnerais beaucoup à manipuler durant plusieurs mois avec un chimiste si expérimenté* ».

Il doit à Laurent d'avoir appris à associer deux instruments : le goniomètre des minéralogistes,

pour mesurer les angles des faces des cristaux et en déduire leurs axes et leur configuration spatiale, et le polarimètre des physiciens pour mesurer la proportion de lumière polarisée dans un rayon lumineux et la rotation du plan de polarisation de la lumière.

La thèse de chimie de Pasteur, soutenue en 1847, est consacrée à l'acide arsénieux et aux arsénites ; sa thèse de physique est consacrée à la polarisation rotatoire (Pasteur, 1847), avec deux parties : *(1) Étude des phénomènes relatifs à la polarisation rotatoire des liquides* et *(2) Application de la polarisation rotatoire des liquides à la solution de diverses questions de chimie*. Il pose, dans l'introduction :

« *Je regarde comme extrêmement probable que la disposition mystérieuse, inconnue, des molécules physiques* [et non chimiques]*, dans un cristal entier et fini de quartz, se retrouve dans les corps actifs, mais, cette fois, dans chaque molécule prise en particulier ; que c'est chaque molécule, prise séparément dans un corps actif, qu'il faut comparer, pour l'arrangement de ses parties, à tout un cristal fini de quartz.* » On retrouve là ce qu'avaient déjà écrit Biot et d'autres, avec un usage du mot « molécule » qui n'est pas le nôtre.

Dans son mémoire de thèse, Pasteur rapporte des mesures des pouvoirs rotatoires des divers « tartrates » (des tartrates (+), notamment de sodium, de potassium, d'ammonium), et il apprend à en reconnaître les cristaux particuliers. Il explore également le déplacement des ions constitutifs (la question qui avait intéressé Marggraf) : « *Lorsqu'un acide est versé dans une dissolution saline, l'acide du sel est éliminé en partie, bien qu'il ne puisse ni se précipiter ni se volatiliser dans les circonstances où l'expérience est faite.* » Et il utilise à cette fin l'« acide tartrique » (+), mesurant le pouvoir rotatoire, pour lequel on savait que la rotation dépendait de la concentration (au début de son texte, il rappelait qu'une solution d'« acide tartrique » (+) avait une rotation deux fois moindre quand elle était allongée d'une partie d'eau ou d'une solution optiquement inactive).

Le 18 janvier 1848, il présente une *Note sur la cristallisation du soufre* (Pasteur, 1848a). Cette fois, il reproduit Mitscherlich, qui avait observé deux types différents de cristaux, pour le soufre, observant avant lui cette occurrence de dimorphisme. Il fait ses armes à la fois dans la reconnaissance des cristaux et dans leur caractérisation géométrique (reconnaissant notamment des cristaux en forme de prismes obliques à base rhombe, dont l'angle des pans est de 90 ° 32 ', avec un angle de la base sur les pans latéraux de 94 ° 6 '). Et il présente à l'Académie des sciences un échantillon de soufre cristallisé dans le sulfure de carbone, par évaporation spontanée à la température ordinaire, sur lequel on voit deux formes cristallines différentes du soufre.

Le 6 mars 1848, il présente des recherches sur le sulfate de potassium (Pasteur, 1848b), taillant une lame à faces parallèles perpendiculairement à l'axe principal du cristal. On note que Pasteur travaille non seulement avec les méthodes de Laurent, mais aussi à partir des cristaux obtenus par Laurent :

« *M. Laurent avait eu l'obligeance de me remettre de beaux cristaux de sulfate de potasse, dont plusieurs offraient la base de la forme primitive. La mesure des angles indiquait, par une différence qui ne dépassait pas cependant 20 minutes, que ce double dodécaèdre appartenait bien au prisme rhomboïdal. Néanmoins la régularité d'un de ces cristaux était telle, que je désirai me convaincre autrement que cette forme n'appartenait pas au système hexagonal régulier.* ».

On observe aussi que, même si Pasteur a pu être actif, le rythme de publication est « soutenu » ; d'ailleurs la comparaison des textes successifs montre des paragraphes souvent semblables ou identiques.

Le 20 mars 1848, l'article publié est cette fois une présentation générale (aujourd'hui, on parle aussi de « synthèse » ou de « revue ») des divers composés connus pour présenter des cristaux différents (Pasteur, 1848c). Puis vient une note sur l'isomorphisme (Pasteur, 1848d) : un peu plus d'une page, qui fait référence au mémoire précédent, et qui annonce un travail qui

suivra. Bien sûr, c'est une pratique courante que de faire des synthèses quand on explore un sujet, mais on ne peut s'empêcher de noter un mode de publication qui n'est guère resserré, avec d'ailleurs une rédaction qui ne l'est pas non plus.

Le 8 mai 1848, soit une semaine avant la date parfois fautive d'attribution du mémoire du 22 mai (Gal, 2008), Pasteur dépose un pli cacheté à l'Académie des sciences (Académie des sciences, 1964) :

« *J'ai l'honneur d'adresser à l'Académie des Sciences, sous pli cacheté, les résultats principaux d'un travail sur les Tartrates et les Paratratrates. En étudiant avec soin les formes cristallines de tous les Tartrates quelle que soit d'ailleurs leur formule chimique, j'ai vu qu'il y avait entre toutes ces formes cristallines une relation frappante dans certains angles, indice certain de l'existence d'un groupe moléculaire invariable. Assurément les Chimistes savent bien qu'il y a quelque chose de commun entre tous les sels d'un même acide. Le résultat que je signale en confirmant cette opinion nous montre la relation étroite qui existe entre la constitution moléculaire et la forme cristalline, et j'oserais même dire que ce résultat ouvre en quelque sorte une voie nouvelle de recherches en montrant l'importance des études Physico-chimiques. C'est par de telles études que les plus hautes questions de la Chimie, celles relatives à la constitution moléculaire, seront résolues.* […] *Ceci nous montre qu'entre les Tartrates et les Paratartrates la séparation est moins grande qu'on pourrait le croire d'après le fait de leur isomérie. Le groupe moléculaire commun aux Tartrates existe dans les Paratartrates. Mais où donc est la différence entre ces deux séries de sels ? La voici : Les Tartrates sont tous hémyèdres et pyroélectriques ; les Paratartrates ne le sont pas, ou s'ils le sont leur hémyédrie a un tout autre caractère que dans les Tartrates. C'est là qu'est toute la différence entre ces deux séries de sels.* […] *Mais ce qui a échappé à la sagacité de M. Mitscherlich c'est l'hémyédrie du Tartrate. Là est la différence et elle suffit à rendre compte de la différence des propriétés chimiques de ces deux sels et de leur différence d'action sur la lumière polarisée.* »

Nous avons vu que le mot « hémyédrie », ou « hémiédrie », désigne des cristaux qui ne sont pas symétriques. La question de la relation entre la forme cristalline, la composition chimique et la cause de la rotation de la polarisation fait l'objet d'un article du 22 mai 1848 (et non du 15, comme cela a été écrit) (Pasteur, 1848e). Cette fois, Pasteur discute les « tartrates » (+), observant que, dans tous, plusieurs facettes se trouvent inclinées de la même manière les unes par rapport aux autres :

« *Ces faits cependant nous montrent, en outre, l'étroite relation qui existe entre la forme cristalline et la constitution moléculaire, et le jour que l'on peut jeter, par les études cristallographiques, sur l'arrangement des atomes.* »

Et il s'étonne :

« *Laissons de côté, pour l'instant, les tartrates et comparons de même les formes cristallines de tous les paratartrates. On trouvera qu'elles présentent entre elles quelque chose de commun, et, ce qui surprendra au premier abord, à cause de l'isomérie bien connue de ces sels, leur relation est absolument la même que dans les tartrates.* »

Et Pasteur d'ajouter :

« *Eh bien, par le plus grand des hasards, M. Mitscherlich a été induit en erreur, et M. Biot à son tour. Le paratartrate de soude et d'ammoniaque dévie le plan de polarisation ; seulement, parmi les cristaux provenant d'un même échantillon, il en est qui dévient le plan de polarisation à gauche, d'autres à droite.* »

Cette observation, qui est bien l'explication de l'inactivité optique de l'« acide paratartrique », est développée dans un manuscrit plus grandiloquent, en date du 9 octobre, encore 1848 (Pasteur, 1848f) :

« *L'étude des questions relatives à la constitution moléculaire des corps a toujours excité le plus vif intérêt. Chacun apprécie l'importance d'une pareille étude, et mesure les conséquences nombreuses auxquelles peut donner le moindre progrès fait dans cette voie. Pour résoudre ces questions, les recherches purement chimiques ont eu déjà et peuvent*

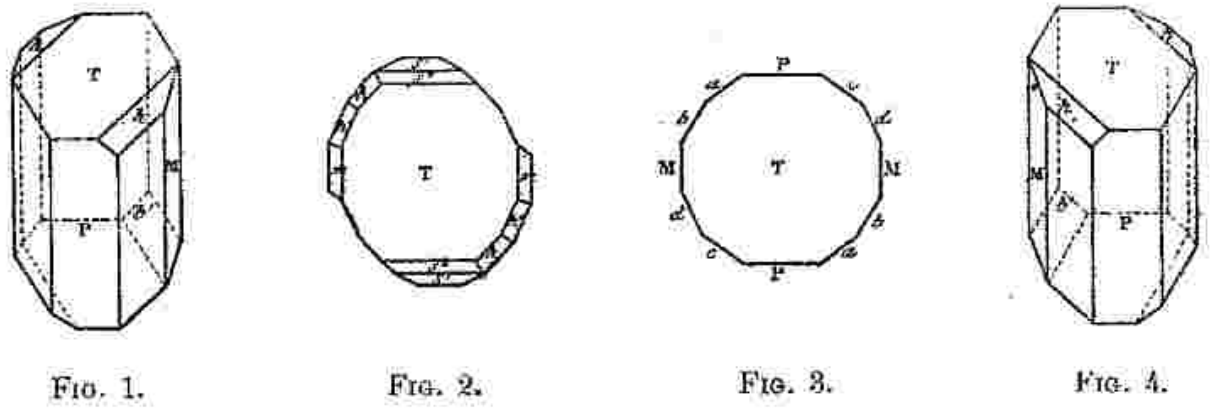


Figure 8. Représentation faite par Pasteur des cristaux d'acide tartrique (+) (à gauche, « Fig. 1 ») et (-) (à droite, « Fig. 4 ») ; les schémas intermédiaires montrent les facettes selon deux vues perpendiculaires (Pasteur, 1848d).

avoir à l'avenir une grande influence. Mais il faut y joindre toutes les autres épreuves que fournissent la physique et la cristallographie. »
L'article contient une note qu'il sera intéressant de retenir, pour la discussion de la prétendue habileté exceptionnelle de Pasteur :
« *Pour obtenir de beaux cristaux, limpides et très volumineux de tartrate neutre de potasse, il faut ajouter du carbonate de potasse à la solution avant de la mettre à cristalliser, de manière à la rendre sensiblement alcaline.* »
Poursuivant son enquête, Pasteur examine les cristaux de « tartrates » et ceux de « paratartrates » (le mélange des formes (+) et (-) en nombres égaux). Il constate que « *l'acide tartrique et toutes ses combinaisons* [ont] *des formes dissymétriques.* [...] *Toutes ces formes tartriques* [ont] *individuellement une image dans la glace qui ne leur* [est] *pas superposable.* » Il attribue à cette particularité de structure, qui existe aussi dans le quartz, la cause du pouvoir rotatoire, dans les « molécules » des combinaisons tartriques. L'acide « paratartrique » et ses sels ne possédant pas un tel pouvoir, Pasteur suppose logiquement que leurs cristaux ne présentent pas cette dissymétrie :
« *La dissymétrie de la forme du tartrate correspondra à sa dissymétrie optique ; l'absence de dissymétrie de la forme dans le paratartrate correspondra à l'inactivité de ce sel sur le plan de la lumière polarisée, à son indifférence optique* » (Pasteur, 1883).
Pour les besoins de l'analyse faite ailleurs dans ce texte, on observera que Pasteur ne parle pas ici de « dissymétrie moléculaire », mais seulement de « dissymétrie optique », pour les cristaux, et de « dissymétrie des molécules », avec le sens de « molécule » qui n'est pas le nôtre. On observera que si l'on peut effectivement parler aujourd'hui de chiralité des cristaux manipulés par Pasteur (Gal, 2019), il est donc anachronique et erroné de lui attribuer des idées de « chiralité moléculaire » au sens où nous l'entendons aujourd'hui.
Pasteur constate donc que les cristaux de « tartrate de soude » et d'« ammoniaque » examinés portent « *les petites facettes accusatrices de la dissymétrie* ». Mais il découvre que les cristaux du « paratartrate » correspondant les portent également :
« *L'idée heureuse me vint*, écrit-il, *d'orienter mes cristaux par rapport à un plan perpendiculaire à l'observateur, et alors je vis que dans cette masse confuse des cristaux du paratartrate il y en avait deux sortes sous le rapport de la disposition des facettes de*

dissymétrie. Chez les uns, la facette de dissymétrie la plus rapprochée de mon corps s'inclinait à ma droite, relativement au plan d'orientation dont je viens de parler, tandis que, chez les autres, la facette dissymétrique s'inclinait à ma gauche. En d'autres termes, le paratartrate se présentait comme formé de deux sortes de cristaux, les uns dissymétriques à droite, les autres dissymétriques à gauche. »

Pasteur sépare alors à la pince (dans un laboratoire de chimie, on n'emploie pas les doigts pour manipuler !) les deux sortes de cristaux repérés dans le « paratartrate », et les dissout séparément dans de l'eau : une des solutions fait tourner la polarisation de la lumière à gauche, et l'autre à droite. En revanche, le mélange des deux solutions est inactif sur la polarisation de la lumière. Pasteur en déduit qu'il existe un « acide tartrique droit » et un « acide tartrique gauche » ; ce que l'on a auparavant baptisé « acide paratartrique » est le mélange, en quantités égales, de ces deux formes, la rotation vers la droite du plan de polarisation de la lumière introduite par une moitié des cristaux étant globalement compensée par la rotation vers la gauche introduite par l'autre moitié. En outre, le pouvoir rotatoire des cristaux droits séparés est le même que celui de l'acide tartrique droit (Pasteur, 1848f).

Pasteur identifie alors le composé droit extrait de l'« acide racémique » à l'acide tartrique droit. Il s'aperçoit, de plus, que les cristaux gauches ont une rotation opposée à celle des cristaux droits (en réalité, l'examen des cahiers de laboratoires montre que la rotation était de +7 ° 54 ' pour une forme, et de -6 ° 42 ' pour l'autre ; il attribue cette différence à la difficulté de séparer les gros cristaux des petits cristaux qui sont inclus dans les gros) (Gal, 2019). Il suppose alors que les deux composants de l'« acide racémique » qu'il a séparés ne diffèrent que par des « structures moléculaires » images l'une de l'autre dans un miroir.

Dans un mémoire de 1850, Pasteur donne les nécessaires informations pour estimer l'éventuelle difficulté de la séparation des formes (+) et (-) (Pasteur, 1850a) :

« *Dans le Mémoire qui a précédé celui-ci, et auquel l'Académie a bien voulu accorder son approbation, je signalais déjà l'existence de ces deux acides, mais je ne les avais obtenus qu'en quantité excessivement petite. Tout ce que j'avais pu constater, c'est qu'ils avaient des pouvoirs rotatoires inverses. Depuis lors, j'ai pu les produire avec abondance, grâce à l'obligeance extrême avec laquelle M. Kestner, de Thann, l'auteur de la découverte de l'acide racémique, a bien voulu mettre à ma disposition une assez grande quantité de cet acide. Je profite de cette occasion pour remercier ici publiquement cet industriel distingué. Je dois attacher d'autant plus de prix à cette obligeance que ce singulier acide racémique ne se produit plus. Non seulement M. Kestner n'en obtient pas trace dans sa fabrication depuis l'époque de sa découverte, mais il a fait des essais variés pour le reproduire, et il n'y est point parvenu.* »

Il faudrait une étude lexicale quantitative pour savoir si un tel texte est idiosyncratique ou simplement daté (« accorder son approbation », « excessivement », « distingué », « obligeance »...). En tout cas, Pasteur poursuit :

« *La matière première à l'aide de laquelle je sépare de l'acide racémique les deux acides qui entrent dans se composition est le racémate double de soude et d'ammoniaque. C'est l'intermédiaire par lequel je suis obligé de passer pour arriver à la préparation de l'acide dextroracémique et de l'acide lévoracémique. Si l'on sature des poids égaux d'acide racémique par de la soude et de l'ammoniaque, et qu'on mêle les liqueurs neutres, il se dépose par refroidissement, ou par évaporation spontanée, un sel double en cristaux d'une grande beauté, et que l'on peut obtenir en trois ou quatre jours* avec des dimensions extraordinaires, quelquefois de plusieurs centimètres de longueur et d'épaisseur » [c'est nous qui soulignons].

Ici, on propose de retenir la dernière phrase : Pasteur ayant obtenu des cristaux de plusieurs centimètres de longueur et d'épaisseur, il n'avait pas besoin d'une vue très aiguë pour faire les séparations ; d'ailleurs, pour mesurer les angles

des faces, il faut être capable de disposer les cristaux sur le goniomètre, ce qui ne se fait pas avec des objets trop petits. Quant à l'usage d'une pince pour manipuler des composés, elle est de simple rigueur dans un laboratoire de chimie.

Pasteur poursuit :

« *En examinant attentivement et un à un les cristaux qui se déposent dans cette opération, j'ai reconnu, ainsi que je l'ai expliqué dans mon premier travail, qu'il y avait deux sortes de cristaux, les uns hémièdres à droite, et les autres hémièdres à gauche, et exactement en même poids, quelle que soit l'époque de la cristallisation. La solution des cristaux hémièdres à droite dévie à droite le plan de polarisation, celle des cristaux hémièdres à gauche dévie à gauche, de la même quantité absolue toutes deux, et à part la disposition des facettes hémiédriques, les deux espèces de cristaux sont d'une parfaite identité sous tous les rapports.* »

Plus de détails sont ensuite donnés sur le protocole opératoire, qui est donc la clé du travail, de sorte que nous donnons la totalité du texte :

« *Pour isoler ces deux sels l'un de l'autre, il faut examiner successivement chaque cristal, en distinguer le caractère hémiédrique, et mettre ensemble tout ceux dont les facettes hémiédriques ont la même orientation. Si les cristaux s'enchevêtrent, s'ils sont groupés et assis les uns sur les autres, on ne peut faire le triage que j'indique que sur une faible partie de la cristallisation. Autant que possible, il faut des cristaux isolés, très nets, portant les facettes qui accusent l'hémiédrie et son sens. J'ai remarqué que si à une dissolution saturée froide, l'eau mère d'une cristallisation par exemple, on ajoutait une certaine quantité des cristaux mixtes, qu'on fasse dissoudre ceux-ci à chaud dans cette solution, en trois ou quatre jours on avait de très beaux cristaux, isolés, facile à choisir. La quantité de sel solide que l'on ajoute à l'eau mère varie avec la température, mais elle doit être telle que, par refroidissement, il ne se dépose dans les premières vingt-quatre heures que quelques cristaux seulement. Ceux-ci sont alors très éloignés, et dans les jours suivants on les voit grossir et augmenter en nombre. La dissolution de ce sel perd de l'ammoniaque par évaporation ; il en résulte un dépôt peu abondant de cet acide en très petits cristaux. Pour empêcher la formation de ce sel acide, j'ajoute quelques gouttes d'ammoniaque à la solution au moment où je la mets à cristalliser.*

Lorsqu'en suivant ces précautions on a obtenu une belle cristallisation, on décante l'eau mère, on essuie chaque cristal séparément avec du papier buvard froissé entre les mains, et l'on procède au triage des deux espèces de cristaux. J'ajouterai encore qu'il faut toujours retirer une cristallisation le matin, parce que l'élévation de la température de la journée fait redissoudre les cristaux en partie, ce qui fait disparaître les petites facettes hémiédriques.

On conçoit très bien que par ce triage il est difficile d'isoler complètement le dextroracémate du lévoracémate. En séparant deux cristaux inverses, accolés, il se peut qu'une parcelle de l'un reste sur l'autre. Ces cristaux renferment en outre à leur surface, si on ne les a pas bien essuyés, et toujours dans leur intérieur, une petite quantité d'eau mère, et cette eau mère contient les deux sels. La purification est très simple. Il suffit de faire cristalliser séparément le dextroracémate et le lévoracémate extraits par un premier triage. On obtient ainsi les deux espèces de sels très purs, et, bien entendu, le caractère hémiédrique se conserve pour chacun. La solution de lévoracémate ne donne par cristallisation nouvelle aucun cristal qui porte à droite les facettes hémiédriques ; la solution de dextroracémate n'en donne aucun qui les porte à gauche. C'est seulement la cristallisation des dernières portions d'eaux mères qui donnerait des cristaux droit et gauche. »

On le voit : aucune habileté n'était nécessaire pour trier les cristaux, contrairement à ce qui est parfois dit (Kaufmann et Myers, 1975). L'acte essentiel est la cristallisation des cristaux, ainsi que leur reconnaissance, ce qu'il avait appris à faire sous la direction de Laurent et de Delafosse. En outre, une note publiée par Laurent le 12 juin, rarement citée par les historiens, montre bien combien

Pasteur a bénéficié des apports de Laurent, pour ce qui concerne les relations entre le cristal et la « molécule » (voir la note complète dans les Matériels supplémentaires 3) (Laurent, 1848) :
« *Les recherches que j'ai entreprises sur la chimie organique m'ont conduit, il y a quelques années, à signaler divers rapports qui existent entre la forme cristalline et la composition des corps. Les conclusions auxquelles je suis arrivé, ont été accueillies avec une telle défaveur dans les Annuaires de chimie, et par les minéralogistes, que je crois devoir saisir l'occasion qui m'est offerte par les derniers travaux de M. Pasteur, pour rappeler en peu de mots ce que j'ai publié sur ce sujet, en y joignant quelques faits nouveaux qui peuvent s'y rattacher.* »
Pour terminer, on observera que Pasteur eut sans doute de la chance, car les répétitions de ses expériences n'ont pas toujours donné les résultats escomptés (Kauffmann et Myers, 1975) : Frederick Stanley Kipping et William Jackson Pope ont dédoublé les tartrates de sodium et d'ammonium (+)(-) par cristallisation fractionnée, à partir de solutions aqueuses de (+)-glucose ou de (-)-fructose (Kipping et Pope, 1925). Initialement ils ont cru que les difficultés de résolution étaient dues à l'influence du sucre asymétrique présent, mais ils identifièrent finalement qu'elles résultaient plutôt de la présence de cristaux optiquement actifs présents dans la poussière du laboratoire de Biot ou de Pasteur. Les résultats de Kauffmann et Myers ont corroboré cette hypothèse, lors de la production de cristaux qui atteignaient 10 millimètres de longueur.

La construction du mythe

Après les études des acides tartriques et des tartrates, Pasteur prolongea son travail avec des études de l'asparagine et de l'acide malique, notamment (Pasteur, 1850b) ; c'est ainsi qu'il en vient à l'étude des acides aminés connus à l'époque, puis d'autres molécules du vivant (Gal, 2008b). Une dernière citation montre qu'il sut élargir la question :
« *Dans mes premiers travaux, accueillis par l'Académie avec tant de bienveillance, j'ai montré qu'il existait une connexion étroite entre l'hémiédrie non superposable et le phénomène de la polarisation rotatoire. Cela posé, une question se présentait naturellement à l'esprit. Toutes les substances, aujourd'hui très nombreuses, qui dévient le plan de polarisation, lorsqu'elles sont en dissolution, ont-elles des formes cristallines hémiédriques ? Réciproquement, l'hémiédrie accuse-t-elle toujours l'existence de la propriété rotatoire ?* »
Il se répète quasiment ensuite (Pasteur, 1851). Au total, il y a 53 mémoires consacrés à la « dissymétrie moléculaire », et parfois espacés d'un mois ou deux seulement.
Plus tard, l'histoire qu'il donnera, notamment dans les *Leçons de chimie professées en 1860* (Société chimique de Paris, 1861), ne correspondra pas aux faits :
« *Le paratartrate et le tartrate (doubles) de soude et d'ammoniaque ont la même composition chimique, la même forme cristalline avec les mêmes angles, le même poids spécifique, la même double réfraction et, par conséquent, les mêmes angles entre les axes optiques. Dissouts dans l'eau, leur réfraction est la même. Mais le tartrate dissout tourne le plan de la lumière polarisée et le paratartrate est indifférent, comme M. Biot l'a trouvé pour toute la série de ces deux genres de sels ; mais ici la nature et le nombre des atomes, leur arrangement et leurs distances, sont les mêmes dans les deux corps comparés.*
Cette note de M. Mitscherlich m'avait singulièrement préoccupé à l'époque de sa publication. J'étais alors élève à l'École normale, méditant à loisir sur ces belles études de la constitution moléculaire des corps, et parvenu, je le croyais du moins, à bien comprendre les principes généralement admis par les physiciens et les chimistes. La note précédente troublait toutes mes idées. »
Geison (1995) a analysé les cahiers de laboratoire de Pasteur, et montré que l'histoire narrée en 1860 était infidèle. Flack, également (Flack, 2009), signale que les cahiers de

laboratoires de Pasteur « montrent clairement » que la recherche qui a conduit à la découverte de la « dissymétrie moléculaire » n'était pas motivée par l'énigme soulignée par Mitscherlich et présentée par Biot (Biot, 1844), ce que confirme la lecture du manuscrit de mars 1848 (Pasteur, 1848c).

Son gendre René Valléry-Radot (1853-1933), homme de lettres, contribuera plus tard à l'édification du « mythe Pasteur » (Valléry-Radot, 1884) :

« *M. Balard courut au ministère et parla de son préparateur dans des termes tels que la nomination fut rapportée. M. Pasteur resta au laboratoire de l'École normale. Pour se fortifier dans la science des cristaux, il prit pour guide un travail étendu de M. de La Provostaye. Je répéterai, se disait M. Pasteur, toutes les mesures d'angles, toutes les déterminations de M. de la Provostaye et je comparerai mes résultats aux siens. Le travail de ce physicien, connu par la précision et l'exactitude de ses recherches, avait pour objet l'acide tartrique, l'acide paratartrique et leurs combinaisons salines.*

Il y a deux ou trois ans, M. Pasteur, après m'avoir cité textuellement, sur une route du Jura, où nous nous promenions ensemble, cette note de Mitscherlich, me raconta, avec un enthousiasme de savant, le plaisir qu'il avait eu à faire cristalliser l'acide tartrique et ses sels dont les cristaux, disait-il, rivalisent en dimension et en beauté avec les plus belles formes cristallines connues. ''J'aurai bien de la peine, lui dis-je, à vous suivre à travers cet acide tartrique, ces tartrates et ces paratartrates. Autant vos autres études m'ont toujours attiré, autant celles qui ont pour point de départ la note de Mitscherlich et le mémoire de M. de La Provostaye m'ont paru, chaque fois que j'ai essayé de m'y remettre, d'un accès difficile. Ah! ajoutai-je, vous auriez bien dû, par égard pour ceux qui aiment à parler de vos travaux, ne pas faire de découvertes dans cette voie-là !

— Est-il possible, s'écria M. Pasteur avec un singulier mélange d'indignation et d'indulgence, que vous n'ayez jamais entrevu, derrière ces recherches de physique et d'optique moléculaires, de grands horizons ! Si j'ai un regret, c'est de ne pas avoir suivi cette route, moins rude qu'il ne semble, et qui doit conduire, j'en suis convaincu, aux plus belles découvertes. Par un brusque détour, elle m'a subitement jeté dans les fermentations, les fermentations m'ont jeté à leur tour dans l'étude des maladies, mais je reste désolé de n'avoir jamais eu le temps de revenir sur mes pas.”

Alors, avec une simplicité d'exposition où l'on sentait l'homme qui a été professeur et qui s'est toujours efforcé de mettre ses idées à la portée de ses auditeurs : "Si l'on envisage, me dit-il, tous les corps de la nature, qu'ils appartiennent au règne minéral, au règne animal, au règne végétal, ou que l'on considère même des objets, fabriqués par la main des hommes, on s'aperçoit qu'ils se distribuent en deux grandes catégories. Les uns ont un plan de symétrie, les autres n'en ont pas. Voici une table, une chaise, un dé à jouer, le corps d'un individu, on peut imaginer un plan passant par ces objets et le corps humain et qui les partage en deux moitiés absolument pareilles. Ainsi, un plan qui passerait par le milieu du siège et du dos d'un fauteuil laisserait à sa droite les mêmes parties que celles qui seraient à sa gauche. De même, un plan vertical qui passerait par le milieu du front, le milieu du nez, de la bouche, du menton d'un individu laisserait à droite un ensemble de parties que l'on retrouverait du côté gauche. C'est bien simple, n'est-ce pas ?" »

Ici pas un mot de Biot ni de Laurent, tout comme dans le texte d'Émile Duclaux, qui fut un élève de Pasteur et rédigea une biographie de ce dernier (Duclaux, 1896).

Biologie et chiralité

Nous ne décrirons pas davantage les travaux de Pasteur et, notamment, son insistance sur la chiralité des molécules biologiques ou les relations avec les fermentations, avec, notamment, la capacité qu'ont des micro-

organismes de produire des composés chiraux, car cela dépasse le cadre de notre présente étude. En revanche, il faut observer que les travaux de Pasteur ne sont pas la fin de l'aventure scientifique de la chiralité.

Le mot « chiralité » (du grec *cheir*, la main) fut introduit par Thomson le 16 mai 1893 (Thomson, 1894 ; Cross et Klyne, 1976 ; Jonas, 1997 ; Gerlach, 2013) : « *the magnetic rotation as neither right-handed nor left-handed quality (that is to say, no chirality)* », et dans une note en bas de la page 619 :

« *I call any geometrical figure or group of points chiral and say it has chirality, if its image in a plane mirror, ideally realized, cannot be brought to coincide with itself. Two equal and similar right hands are homochirally similar. Equal and similar right and left hands are heterochirally similar. They are also called enantiomorphs as introduced by German writers I believe. Any chiral object and its image in a plane mirror are heterochirally similar.* » (Traduction personnelle : Je nomme chiral toute figure géométrique ou groupe de points, et je dis qu'il y a chiralité, si l'image de l'objet dans un miroir plan, même avec une idéalisation, ne peut être mise en coïncidence avec l'objet lui-même. Deux mains droites égales et similaires, sont homochiralement similaires. Des mains gauches et droite égales et similaires sont hétérochiralement similaires. Elles sont également énantiomorphes, selon la terminologie introduites probablement par des Allemands. Tout objet chiral et son image dans un miroir plan sont hétérochiralement similaire.)

Cela venait après les travaux du Français Joseph Achille Le Bel (1847-1930) et du Hollandais Jacobus Henricus van't Hoff (1852-1911), qui envisagèrent la disposition des atomes dans l'espace (cette fois, avec l'acception moderne du terme : le travail se situe 17 ans après le congrès de Karlsruhe) (Prelog, 1975). Ils comprirent que des atomes de carbone liés à quatre groupes différents sont non superposables à leur image dans un miroir, donnant ainsi une explication à la chiralité des molécules, et ils créèrent la « stéréochimie » (le terme est du chimiste zurichois Victor Meyer), c'est-à-dire la chimie qui tient compte de la répartition des atomes dans l'espace.

Un objet, telle une molécule (au sens moderne), est dit aujourd'hui chiral quand il n'est pas identique à son image dans un miroir ; il est achiral sinon. Le mot « chiralité » a remplacé le mot « dissymétrie », qui était utilisé dès avant l'époque de Pasteur, sans doute pour la première fois en 1820 (Gal, 2019) par le minéralogiste suisse Frédéric Soret (1795-1865).

Toutes les molécules chirales sont optiquement actives, et les molécules de tous les composés optiquement actifs sont chirales. Le terme « asymétrique », différent du terme « dissymétrique », a été utilisé par van't Hoff, parce qu'il n'y a pas de plan de symétrie à travers un tétraèdre dont les sommets sont occupés par quatre atomes ou groupes d'atomes différents (un tel tétraèdre est chiral) (Mislow, 1999 ; Flapan, 2000 ; Dunitz, 2019 ; Petitjean, 2020 ; Petitjean, 2021; Gal, 2019).

Les molécules qui sont images dans un miroir l'une de l'autre sont dites « énantiomères ». Les énantiomères dont la configuration absolue est inconnue peuvent être différenciés par des noms tels que « dextrarotatoires » (préfixe +) ou « lévarotatoires » (préfixe -) selon la direction dans laquelle ils font tourner le plan de polarisation de la lumière. On n'utilise plus les lettres d (pour +) et l (pour -). Les noms des composés chiraux dont la configuration absolue est connue sont assortis des préfixes R, S (R pour *rectus*, droit, et S pour *sinister*, gauche) (Cross et Klyne, 1976).

Aujourd'hui, on sait donc finalement qu'il y trois stéréoisomères de l'« acide tartrique » : la forme (+), la forme (-), et la forme achirale « méso », ou acide (2R, 3S)-tartrique, qui a un centre de symétrie au milieu de ses deux atomes de carbone centraux, et dont la découverte reste entourée d'un mystère. En effet, Pasteur (1853) écrit avoir découvert un autre acide tartrique optiquement inactif comme produit de réaction du tartrate de quinine, de quinidine et de cinchonidine chauffés pendant « cinq à six heures » à 170 °C :

« *Le rôle principal de la cinchonidine, dans cette*

opération, est de donner un peu de stabilité à l'acide tartrique, et de lui permettre de supporter, sans se détruire, une température qui l'altérerait rapidement s'il était libre. […] *J'ai obtenu, en même temps que le racémique, un acide tartrique sans action aucune sur la lumière polarisée, et jamais résoluble dans les mêmes circonstances que le racémique en acide tartrique droit et en acide tartrique gauche, acide extrêmement curieux, cristallisant parfaitement et donnant des sels qui, par la beauté de leurs formes, ne le cèdent ni aux tartrates, ni aux racémates.* […] *La chimie se trouve donc aujourd'hui en possession de quatre acides tartriques : l'acide droit, l'acide gauche, la combinaison des deux ou le racémique, et l'acide inactif, qui n'est ni droit ni gauche, ni formé de la combinaison du droit et du gauche. C'est de l'acide tartrique ordinaire détordu, si je puis me servir de cette expression qui rend grossièrement ma pensée et peut-être va plus loin qu'elle, car on ne saurait avoir trop de prudence dans l'étude de ces questions difficiles* ».

On observera que Pasteur ne donne pas de preuve que la nouvelle forme de l'acide tartrique ait été un composé chiral bien identifié, et non un racémate, bien qu'il ait dit en 1860 que l'acide tartrique méso ne pouvait pas se résoudre en acides (2R,3R)- et (2S, 3S)-tartriques (Flack, 2009). Mieux encore, l'article de 1853 est étonnamment succinct, quant aux méthodes mises en œuvre, tout comme aux résultats obtenus.

On peut être d'autant plus surpris que, en 1862, M. Dessaignes (Dessaignes, 1862) décrit une découverte faite par lui d'un corps qu'il nomme acide mésotartrique :

« *La production de l'acide tartrique par l'oxydation du sucre de lait, celle de l'acide racémique par l'oxydation de la dulcine, m'ont fait espérer que l'on pourrait obtenir directement l'acide tartrique gauche en traitant par l'acide nitrique la sorbine qui dévie à gauche le plan de polarisation de la lumière. J'ai donc étudié cette réaction et, en suivant à peu près le procédé de M. Liebig, j'ai produit et isolé deux acides : l'un racémique ordinaire, caractérisé par la forme et la composition de son sel de chaux ; l'autre, l'acide tartrique droit. En effet, mélangé en parties égales avec l'acide ordinaire, il ne forme pas d'acide racémique ; de plus, M. Chautard s'est assuré, à ma prière, qu'il dévie à droite la lumière polarisée. En traitant successivement par l'acétate de chaux et par l'acétate de plomb le sirop acide, dont j'avais séparé, autant que possible, le biracémate et le bitartrate de d'ammoniaque, j'ai obtenu deux acides dont la purification a été longue et difficile. Celui qui est surtout contenu dans le précipité par l'acétate de plomb, et que je propose de nommer acide aposorbique, présente les propriétés suivantes*[…]. *Le deuxième acide que j'ai extrait du précipité par l'acétate de chaux a été aussi obtenu par moi par la transformation de l'acide tartrique et de l'acide racémique, soumis à l'action très prolongée (au moins 400 heures) de l'acide chlorhydrique bouillant. Quand je le prépare à l'aide de l'acide tartrique, après avoir éloigné par cristallisation l'acide tartrique non altéré et un peu d'acide racémique, après avoir chassé l'acide chlorhydrique au bain-marie, je sature à demi par l'ammoniaque, ce qui donne beaucoup de bitartrate ammoniaque ; je filtre, je concentre la liqueur, qui laisse cristalliser de magnifiques cristaux compliqués par de nombreuses facettes, d'un bisel ammoniaque de l'acide nouveau. Quand je le prépare avec l'acide racémique, je fais cristalliser l'acide racémique non altéré, je chasse l'acide chlorhydrique au bain-marie, sature à moitié par l'ammoniaque et précipite par l'acétate de chaux. Cet acide, que j'appellerai mésotartrique, offre des tables rectangulaires se recouvrant.* […] *On voit que cet acide a la composition de l'acide racémique.* »

Connaissant la pugnacité de Pasteur, notamment à propos des questions de priorité scientifique, on doit s'étonner qu'il ait laissé Dessaignes publier sa découverte s'il avait véritablement découvert l'acide tartrique méso, et, de surcroît, on comprend difficilement comment les rapporteurs du texte de Dessaignes, à l'Académie des sciences, auraient pu accepter de publier un résultat aussi

important s'il avait été déjà obtenu par Pasteur. Or c'est un fait que la communication de Dessaignes a été acceptée, et qu'elle n'a suscité aucune réaction de Pasteur (à notre connaissance). On ajoutera que, dans la communication de Pasteur, en 1853, ce dernier ne dit rien des cristaux pour cet acide mésotartrique qu'il aurait obtenu.

Conclusion

Rétrospectivement, on ne refusera évidemment pas à Pasteur une contribution notable à propos de la chiralité, mais on devra bien la resituer dans le fil complet des travaux qui ont forgé la compréhension actuelle, laquelle a considérablement progressé avec les travaux de Vladimir Prelog, de Robert Sidney Cahn et de Christopher Ingold (Prelog et Helmchen, 1982), qui ont proposé un système cohérent de désignation des molécules chirales, avec l'emploi des lettres R et S pour désigner les configurations absolues des unités stéréogéniques, puis, avec les recommandations de l'IUPAC, qui a finalement émis ses recommandations sur le sens à donner au mot « chiralité » et les pratiques de désignation des composés chiraux (Moss, 1996). Aujourd'hui, les questions de chiralité sont encore largement discutées (Mislow et Bolstad, 1955 ; Mislow et Bicart, 1976-1977 ; Mislow et Siegel, 1984 ; Mislow, 1999 ; Flapan, 2000 ; Prelog, 2016 ; Dunitz, 2019 ; Petitjean, 2020, 2021), et elles sont devenues essentielles en synthèse organique.

Références

Académie de Reims. 2014. *Protocole pour faire croître un cristal,* https://web.ac-reims.fr/dsden52/ercom/documents/sciences/fete_science_2014/documentation_enseignant/protocole_cristal.pdf, dernier accès 2021-08-04.

Académie des sciences. 1964. *Trois plis cachetés de Louis Pasteur ouverts le 16 décembre 1963*, Gauthier-Villars & Cie, Paris.

Arago F. 1811. *Sur une modification remarquable qu'éprouvent les rayons lumineux dans leur passage à travers certains corps diaphanes et sur quelques autres nouveaux phénomènes d'optique, Mémoires de la classe des sciences mathématiques et physiques de l'Institut Impérial de France*, 12(1), 93-134.

Arago F. 1817. *Mémoire sur les couleurs des lames minces*. In *Œuvres complètes de F. Arago*, t. X, Paris, 1858, I-35.

Arago F. 1859. *Biographies of Distinguished Scientific Men* (Smyth WH, Powell B, Grant R trad), Ticknor and Fields, Boston Ma (USA).

Arago F. 1865. *Mémoire sur la polarisation colorée*. In *Oeuvres de François Arago*, Theodore Morgand, Paris, 36-74.

Banchetti-Robino MP. 2013. *19th century atomism and the empirical nature of the chemical atom : Dalton against Lavoisier,* International Society for the Philosophy of Chemistry, Universidad de la Republica, Montevideo, Uruguay.

Bartholin R. 1669. *Experimenta crystalli islandici disdiaclastici quibus mira & infolita refractio detegitur*, Danielis Paulli, Copenhagen, Danemark.

Baumé A. 1763. *Manuel de chymie, ou exposé des opérations et des produits d'un cours de chymie. Ouvrage utile aux personnes qui veulent suivre un cours de cette science, ou qui ont dessein de se former un cabinet de chymie*, Paris, 392.

Bentley R. 1995. *From optical activity in quartz to chiral drugs: molecular handedness in biology and medicine, Perspectives in Biology and Medicine,* 38 (2), 188-229.

Biot JB. 1811. *Mémoire sur de nouveaux rapports qui existent entre la réflexion et la polarisation de la lumière par les corps*

cristallisés, Mémoire de l'Institut, 1, 135-280.

Biot JB. 1815. Phénomènes de polarisation successive, observés dans les fluides homogènes, *Bulletin de la Société Philomatique de Paris,* 1, 190-192.

Biot JB. 1816. Mémoire sur l'utilité des lois de polarisation de la lumière, pour reconnaître l'état de cristallisation et de combinaison dans un grand nombre de cas où le système cristallin n'est pas immédiatement observable, *Mémoire de l'Académie des sciences*, I, 275-346.

Biot JB. 1817. *Mémoire sur les rotations que certaines substances impriment aux axes de polarisation des rayons lumineux, Mémoire de l'Académie des sciences,* II, 41-136.

Biot JB. 1818. *Second mémoire sur la double réfraction*. In *Oeuvres complètes*, t. II, Paris, 479-596.

Biot JB. 1835. Mémoire sur la polarisation circulaire et sur ses applications à la chimie organique, *Mémoires de l'Académie des sciences de l'Institut de France,* 13, 39-175.

Biot JB. 1838a. Méthodes mathématiques et expérimentales pour discerner les mélanges et les combinaisons chimiques définies ou non définies, qui agissent sur la lumière polarisée ; suivies d'applications aux combinaisons de l'acide tartrique avec l'eau, l'alcool et l'esprit de bois, *Mémoire de l'Académie des sciences*, 15, 93-279.

Biot JB. 1838b. *Sur l'emploi de la lumière polarisée pour manifester les différences des combinaisons isomériques, Annales de chimie et de physique (II),* 69, 22.

Biot JB. 1844. *Communication d'une Note de M. Mitscherlich par M. Biot, Compte rendu des séances de l'Académie des sciences*, Séance du lundi octobre 1844. Mémoires et communication des membres et des correspondants de l'Académie. Chimie optique, 6, 645-649.

Bohm J. 1985. The history of crystal growth, *Acta Physical Hungarica*, 57(3-4), 161-178.

Chambron JC, Keene FR. 2017. *Principles of molecular chirality.* In Keene FR (ed) *Chirality in supramolecular assemblies : causes and consequences*, John Wiley & Sons, New York, USA.

Compain JC. 1992. Les travaux de Le Bel et van't Hoff de 1874 et notre enseignement, *Bulletin de l'Union des physiciens,* 86(741), 295-311.

Cross LC, Klyne W (eds). 1976. Rules for the nomenclature of organic chemistry. Section E : stereochemistry. *Pure and Applied Chemistry,* 45, 11-30.

CU Boulder. 2021. *Organic chemistry,* https://orgchemboulder.com/Technique/Procedures/Crystallization/Crystallization.shtml, dernier accès 2021-08-04.

Delépine M. 1935. *Isomérie optique*. In Grignard V *et al.*, *Traité de chimie organique*, Masson, Paris, 1, 857.

Dessaignes M. 1862. Sur deux acides organiques nouveaux, *Comptes rendus de l'Académie des sciences,* juillet-décembre 1862, 769-770.

Dolomieu J. 1801. *Sur la philosophie minéralogique et sur l'espèce minéralogique*, Bossange, Masson et Besson, Paris.

Dri P. 1999. Pasteur, *Les génies de la science*, Pour la Science, 33, 37.

Duclaux E. 1896. *Pasteur, Histoire d'un esprit,* Charaire, Sceaux.

Dunitz JD. 2019. Bad langage, *Angewandte Chemie (Int Ed Engl),* 58, 1248-1250.

Fernandez B. 2009. *Les deux hypothèses d'Avogadro en 1811*. Bibnum, http://journals.openedition.org/bibnum/448, dernier accès 2021-09-09.

Flack HD. 2009. Louis Pasteur's discovery of molecular chirality and spontaneous resolution in 1848, together with a complete review of his crystallographic and chemical work, *Acta Crystallographica* Section A (Foundations of Crystallography), A65, 371-389, doi:10.1107/S0108767309024088, last access 2023-01-11.

Flapan E. 2000. *When topology meets chemistry, a toological look at molecular chirality*, CUP, New York, NY (USA).

Flaubert G. 1857. *Madame Bovary,* Garnier Frères, Paris.

Fleck GM. 1963. Atomism in late nineteeth-century physical chemistry, *Journal of the history of ideas*, 24(1), 106-114.

Frankel E. 1976. Corpuscular Optics and the Wave Theory of Light: The Science and Politics of a Revolution in Physics, *Social Studies of Science,* 6 (2), 141-184.

Frémy E. 1838. Modifications que la chaleur fait éprouver aux acides tartriques et paratartrique, *Annales de chimie et de physique*, 68, 353-395.

Gal J. 2008a. When did Louis Pasteur present his memoire on the discovery of molecular chirality to the Académie Des Sciences ?, Analysis of a discrepancy, *Chirality*, 20, 1072-1084.

Gal J. 2008b. The Discovery of Biological Enantioselectivity: Louis Pasteur and the Fermentation of Tartaric Acid, 1857-A Review and Analysis 150 Yr Later*, Chirality*, 20, 5-19.

Gal J. 2011. Louis Pasteur, language, and molecular chirality. I. Background and Dissimetry, *Chirality*, 23, 1-16.

Gal J. 2017. Pasteur and the art of chirality, *Nature Chemistry,* 9, 604-605.

Gal J. 2018. In defense of Louis Pasteur : critique of Gerald Geison's deconstruction of Pasteur's discovery of molecular chirality, *Chirality*, 1-22. DOI: 10.1002/chir.23049.

Gal J. 2019a. In defense of Louis Pasteur : critique of Gerald Geison's deconstruction of Pasteur's discovery of molecular chirality, *Chirality*, 31(4), 261-282.

Gal J. 2019b. Louis Pasteur, chemical linguist: founding the langage of stereochemistry, *Helvetica Chemica Acta,* 10.1002/hlca. 201900098.

Gay-Lussac JL. 1826. Note sur un nouvel acide, *Notice lue à l'Académie royale des sciences le 22 novembre 1826,* https://archive.org/stream/ComptesRendusAcademieDesSciencesTable002/TableGnraleDesComptesRendusDesSancesDeLacadmieDesSciences1851-1865_djvu.txt.

Gay-Lussac JL. 1828. *Cours de chimie*, 24e leçon, 2 juillet, 23.

Geison G. 1995. *The private science of Louis Pasteur*, Princeton University Press, Princeton.

Gerlach H. 2013. Chirality: a relational geometric-physical property, *Chirality*, 25, 684-685.

Gibbs JW. 1906. *Scientific Papers*, 1(2), Longmans, Green and Co, London (UK).

Haüy RJ. 1792. *Exposition abrégée de la théorie sur la structure des crystaux*, Cercle social, Paris.

Haüy RJ. 1801. *Traité de minéralogie*, Louis, Paris.

Haüy R-J. 1808. Sur l'arragonite, *Annales du Muséum d'histoire naturelle*, 11, 241-270.

Haüy RJ. 1809. *Tableau comparatif des Résultats de la Cristallographie et de l'Analyse Chimique relativement à la Classification des Minéraux*, Courcier, Paris.

Herschel JFW. 1822. On the rotation impressed by plates of Rock Crystal on the planes of polarization of the rays of light, as connected with certain particularities in its crystallisation, *Cambridge Philosophical Society Transactions*, 1, 43-52.

Hulliger J. 1994. Chemistry and crystal growth, *Angewandte Chemie (Int. Ed. Engl),* 33, 143-162.

Institut de chimie du Canada. 2019. *Manuel d'information sur la concours national de croissance de cristaux*, https://www.cheminst.ca/wp-content/uploads/2019/09/Discover_Chemistry-NCGC_Handbook_Fr_072019.pdf, dernier accès 2021-08-05.

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

Jonas J. 1997. In praise of chirality, *Chemical Papers*, 51, 167-182.

Jungnickel C, McCormmach R. 1996. *Cavendish*, The American Philosophical Society, Philadelphia (PE).

Juvin J, Belhomme MC, Castex S, Bliard C, Haudrechy A. 2021. Un bon croquis vaut mieux qu'un long discours ?, *Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France*, 2, 1-9.

Kahr B. 2018. Polarization in France, *Chirality*, 1-18.

Kaufmann GB, Myers D.1975. The resolution of racemic acid. A classic stereochemical experiment for the undergraduate laboratory, *Journal of Chemical Education*, 52, 777–781.

Kelton KF, Greer AL. 2010. *Nucleation in condensed matter: applications in materials and biology*, Pergamon, London (UK).

Kipping FS, Pope WJ. 1925. Enantiomorphism, *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 127, 606-617.

Kubinga H. 2012. Crystallography from Haüy to Laue : controversies on the molecular and atomistic nature of solids, *Acta Crystallographica* Section A, A68, 3-29.

Kunz GF. 1918. The life and work of Haüy, *American Mineralogist,* 3, 60-89.

Laurent A. 1848. Note sur les rapports qui existent entre la forme et la composition de quelques corps, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, séance du 12 juin, 26, 632-635.

Lenartsson A. 2020. *Carl Wilhem Scheele and Torbern Bergman*, Springer Nature, Genève, Suisse.

Lodge O. 1912. Becquerel, Memorial Lecture, *Journal of the Chemical Society,* 101, 2005-2042.

Malus EJ. 1808. Sur une propriété de la lumière réfléchie par les corps diaphanes, Nouveau Bulletin des sciences, *Société philomatique de Paris,* 1807-1809, 296-299.

Manzola AS, Ben Amor M. 2001. Etude des équilibres des phases du carbonate de calcium : influence des compagnons de cristallisation, *Journal de Physique* IV, 11, Pr10-175-182.

Marbach H. 1856. Ueber die Enantiomorphie und die optischen Eigenschaften von Krystallen des tesseralen Systems, *Poggendorff Annalen,* 99, 451-466.

Marg(g)raf M. 1762. *Opuscules chymiques*, Vincent, Paris, I.

Mascarenhas YP. 2020. Crystallography before the discovery of X-ray diffraction, *Revista Brasileira de Ensino de Fisica*, 42, e20190336.

Mascart E. 1891. *Traité d'optique*, Gauthier-Villars, Paris, 247.

Mauskopf SH. 1976. Crystals and compounds : molecular structure and composition in nineteenth-century French science, *Transactions of the American Philosophical Society,* 66(3), 1-82.

Metz A. 1963. La notation atomique et la théorie atomique en France à la fin du XIXe siècle, *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications,* 16(3), 233-239.

Metzger H. 1969. *La genèse de la science des cristaux*, A Blanchard, Paris.

Michelson AA, Morley EW. 1887. *On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether, The American Journal of Science,* 36, 333-348.

Mislow K. 1999. *Molecular Chirality*. In Denmark SE (ed) *Topics in stereochemistry*, John Wiley & Sons, New York, 22, 1-82.

Mislow K, Bickart P. 1976-1977. An epistemological note on chirality, I*srael Journal of Chemistry,* 15, 1-6.

Mislow R, Bolstad R. 1955. Molecular dissymetry and optical inactivity, *Journal of the American Chemical Society,* 77, 24-25.

Mislow K, Siegel J. 1984. Stereoisomerism and local chirality, *Journal of the American Chemical Society,* 106(11), 3319-3328.

Moss GP. 1996. Basic terminology of stereochemistry, *Pure and Applied Chemistry*, 68, 2193–2222.

Mullin JM. 2001. *Crystallization*, Butterworth-Heinemann, Oxford (UK),

Nicolle J. 1969. *Pasteur - Sa vie, sa méthode, ses découvertes*. Marabout, Paris-Verviers, 43-47.

Partington JR. 1951. *A short history of chemistry*, Macmillan, 2e ed, 104.

Pasteur L. 1847. *Recherches sur la capacité de saturation de l'acide arsénieux. Étude des arsénites de potasse, de soude et d'ammoniaque*. Thèses de chimie et de physique, Faculté des sciences de Paris le 26 août 1847. Imprimerie du Bachelier, Paris, 5-26. In Pasteur Valléry-Radot L (ed) *Oeuvres de Pasteur, I*, Masson et Cie, Paris, 1922.

Pasteur L. 1848a. Note sur la cristallisation du soufre, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, séance du 10 janvier 1848, 26, 48-49.

Pasteur L. 1848b. Recherches sur divers modes de groupement dans le sulfate de potasse, *Comptes rendus de l'Académie des sciences,* séance du 6 mars 1858, 26, 304-305.

Pasteur L. 1848c. Recherches sur le dimorphisme, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, séance du 20 mars 1848, 26, 352-355.

Pasteur L. 1848d. Note sur un travail de M. Laurent intitulé : sur l'isomorphisme et sur les types cristallins, *Annales de chimie et de physique,* 3e série, 23, 294-295.

Pasteur L. 1848e. Mémoire sur la relation qui peut exister entre la forme cristalline et la composition chimique, et sur la cause de la polarisation rotatoire, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, séance du 22 mai 1848, 26, 583-588.

Pasteur L. 1848f. *Recherches sur les relations qui peuvent exister entre la forme cristalline, la composition chimique et le sens de la polarisation rotatoire, Annales de chimie et de physique*, 3e série, 24, 442-459.

Pasteur L. 1850a. Recherches sur les propriétés spécifiques des deux acides qui composent l'acide racémique, *Annales de chimie et de physique*, 3e série, 28, 56-99.

Pasteur L. 1850b. Nouvelles recherches sur les relations qui peuvent exister entre la forme cristalline, la composition chimique et le phénomène de la polarisation rotatoire, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, séance du 30 septembre 1850, 31, 480-483.

Pasteur L. 1851. Nouvelles recherches sur les relations qui peuvent exister entre la forme cristalline, la composition chimique et le phénomène de la polarisation rotatoire, *Annales de chimie et de physique*, 3e série, 31, 67-102.

Pasteur L. 1853. Transformation des acides tartriques en acide racémique. Découverte de l'acide tartrique inactif. Nouvelle méthode de séparation de l'acide racémique en acides tartriques droit et gauche, *Comptes rendus de l'Académie des sciences,* 37, 162-166.

Société chimique de Paris. 1861. *Leçons de chimie professées en 1860 par Pasteur, Cahours Würtz, Berthelot, Sainte-Claire Deville, Barral et Dumas*, Librairie de L. Hachette, Paris.

Pasteur L. 1883. *La dissymétrie moléculaire*, Conférence du 22 décembre 1883 à la Société chimique de Paris. Oeuvres de Pasteur, 1.

Pasteur Vallery-Radot L (ed). 1922. *Oeuvres de Pasteur. I*, Masson et Cie, Paris, 1922.

Petitjean M. 2020. Comment on ''Bad language'', resolving some amgiguities about chirality, *Angewandte Chemie (Int Ed Engl),* 132, 7722-7723.

Petitjean M. 2021. Symmetry, antisymmetry and chirality: use and misuse of terminology, *Symmetry*, 13, 603. https://doi.org/10.3390/sym13040603.

Pobeguin T. 1949. Tartrates neutres de calcium dérivés de l'acide tartrique droit, *Bulletin de la Société française de minéralogie et de cristallographie*, 72(1-3), 189-225.

Prelog V. 1975. *Chirality in chemistry*, Nobel Lecture, https://www.nobelprize.org/ prizes/chemistry/1975/prelog/lecture/, dernier accès 2021-08-08.

Prelog V. 2016. Chirality in chemistry, *Science*, 193, 17-24.

Prelog V, Helmchen G. 1982. Basic principles of the CIP-system. *Angewewandte Chemie (Int Ed Engl)*, 21,567-583.

Rohmer A. 1994. *Charles Kestner, Auguste Scheurer-Kestner, deux figures marquantes du développement de l'industrie à Thann*, Mémoire mulhousienne, http://www.memoire-mulhousienne.fr/files/downloads/scheurer-kestner.pdf, dernier accès 2021-08-06.

Rosmorduc J. 1984. La découverte de la chiralité, de la polarisation rotatoire aux travaux de Pasteur, *Bulletin de l'Union des physiciens,* 68, 85-99.

Ruchon T. 2005. *Interaction magnétochirale : étude théorique et expériences dans les lasers, Physique atomique*, Thèse de l'Université Rennes 1.

Sentosphère. 2021. *La chimie des cristaux*, https://www.sentosphere.fr/fr/jeux-scientifiques/40-la-chimie-des-cristaux.html, dernier accès 2021-08-06.

Szabadváry F. 1966. *History of Analytical Chemistry: International Series of Monographs in Analytical Chemistry*, Elsevier, New York, USA.

Thomson (Kelvin) W. 1904. *Baltimore lectures on molecular dynamics and the wave theory of light*, CJ Clay & Sons, London, 436-619.

Thorpe E. 2015. *The scientific papers of the honourable Henry Cavendish, F.R.S.*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Thorpe JF. 2021. *Stephen Hales, D.D., F.R.S. (1677-1761)*, Notes and records of the Royal Society of London, 3, 53-63. http://doi.org/10.1098/rsnr.1940.0005.

Tipeev AO, Zanotto ED, Rino JP. 2018. Diffusivity, interfacial free energy, and crystal nucleation in a supercooled Lennard-Jones liquid, *Journal of physical chemistry* C, 122, 28884-28894.

Turner SC. 1998. *Goniometer*. In Bud R et Warner DJ (eds) *Instruments of Science. An Historical Encyclopedia*, Garland Publishing, Londres, 290-292.

Usselman MC. 2021. *Willian Hyde Wollaston Biography*, https://www.britannica.com/biography/William-Hyde-Wollaston, dernier accès 2021-08-05.

Vallery-Radot R. 1884. *M. Pasteur : histoire d'un savant / par un ignorant,* J. Hetzel et Cie, Paris.

Verdet E. 1869. *Leçons d'optique physique*, Paris, 286-288.

Edité par
Guilhem Bourrié, membre de l'Académie d'agriculture de France.

Rapporteurs
Ary Bruand, professeur à l'Université d'Orléans, membre de l'Académie d'agriculture de France

Alain Decarreau, professeur à l'Université de Poitiers.

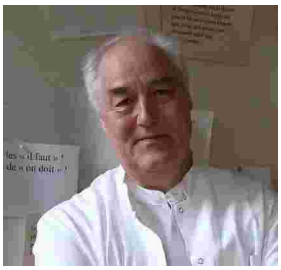
Rubrique
Cet article a été publié dans la rubrique « Notes de recherche » des *Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France.*

Reçu
11 août 2021

Accepté
10 novembre 2021

Publié
3 décembre 2021

Citation
This H. 2021. Des cristaux d'Auguste Laurent et des techniques d'analyse optique de Jean-Baptiste Biot furent directement à l'origine de la découverte de la chiralité par Louis Pasteur, *Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF),* 12(3), 1-33. https://doi.org/10.58630/pubac.not.a894127.



Hervé This est physico-chimiste dans le Groupe de gastronomie moléculaire (UMR 0782 SayFood), professeur consultant à AgroParisTech, directeur du Centre international de gastronomie moléculaire et physique AgroParisTech-INRAE, 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)

Matériel supplémentaire

Des cristaux d'Auguste Laurent et des techniques d'analyse optique de Jean-Baptiste Biot furent directement à l'origine de la découverte de la chiralité par Louis Pasteur

Hervé This [1,2]

1 Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR 0782 SayFood, 75005, Paris, France
2 Group of Molecular Gastronomy, Inrae-AgroParisTech International Centre for Molecular Gastronomy

Correspondance :
herve.this@inrae.fr

1. Louis Joseph Gay-Lussac, à propos des établissements Kestner (Gay-Lussac, 1826 ; 1828) :

« MM. Kestner Père et Fils, de Thann, n'ont présenté à l'exposition que trois de leurs produits chimiques, d'un aspect remarquable et d'un très grand degré de pureté ; à savoir : de l'acide tartrique, du sel d'étain (hydrochlorate d'étain) et du sel de saturne (acétate de plomb). Ces fabricants livrent annuellement au commerce 30 000 kilogrammes d'acide tartrique, dont la moitié environ est exportée et achetée principalement par la Bavière et la Suisse ; 20 000 kilogrammes d'hydrochlorate d'étain dont les débouchés sont les mêmes ; 20 000 kilogrammes de sel de saturne, consommés par les nombreuses manufactures de toiles peintes de l'Alsace. MM. Kestner sont d'ailleurs très avantageusement connus par l'acide pyroligneux, l'acétate de fer et autres produits sortant de leur grand établissement ».

2. Note de Jean-Baptiste Biot relatant les résultats de M. Mitscherlich :

« M. Mitscherlich m'a prié de communiquer en son nom, à l'Académie le résultat d'une très-belle expérience qu'il a faite, et qu'il m'a donné les moyens de répéter ; voici en quoi elle consiste.
On savait que l'acide tartrique possède le pouvoir rotatoire et le communique à toutes ses combinaisons salines, avec des modifications qui affectent seulement l'énergie absolue de l'action et la loi des dispersions éprouvées par les plans de polarisation des

Matériel supplémentaire

différents rayons simples. L'acide paratartrique, au contraire, quoique ayant la même composition pondérale, ne possède pas ce pouvoir, et ne le communique à aucune de ses combinaisons salines.
M. Mitscherlich s'est proposé d'examiner si cette opposition se maintiendrait dans des circonstances où les deux corps comparés seraient semblables, non-seulement par la composition chimique, mais encore par la forme cristalline et les propriétés physiques. Il a trouvé ces conditions réunies, avec une remarquable identité, dans les sels doubles formés par les deux acides avec la soude et l'ammoniaque. Les résultats que ces deux corps lui ont présentés sont décrits par lui-même dans la Note suivante.

‘’Note de M. Mitscherlich. Le paratartrate et le tartrate (doubles) de soude et d'ammoniaque ont la même composition chimique, la même forme cristalline, avec les mêmes angles, le même poids spécifique, la même double réfraction, et par conséquent les mêmes angles entre les axes optiques. Dissous dans l’eau, leur réfraction est la même. Mais le tartrate dissous tourne le plan de la lumière polarisée, et le paratartrate est indifférent, comme M. Biot l'a trouvé pour toute la série de ces deux genres de sels; mais ici la nature et le nombre des atomes, leur arrangement et leurs distances, sont les mêmes dans les deux corps comparés.’’

« J’ai répété avec soin l'expérience de M. Mitscherlich sur des échantillons cristallisés de son paratartrate qu'il m'avait remis. Une solution dosée de ce sel a été observée à travers un tube de 517 millimètres de longueur. Elle n'a présenté absolument aucune trace de pouvoir rotatoire. Je n'ai pas eu l'occasion de mesurer celui du tartrate correspondant. Mais, pour faire apprécier l'ordre de grandeur de ces différences, et combien elles sont manifestes, je dirai qu'une solution de tartrate sodique simple, d'égal dosage, observée dans les mêmes circonstances aurait produit sur le plan de polarisation de la lumière jaune, une déviation de 28 degrés, accompagnée de couleurs très-vives dans les deux images. J'établis ce résultat en note, d'après des expériences publiées dans le tome XVI des Mémoires de l’Académie, et j'indique à cette occasion quelques précautions pratiques à l'aide desquelles on peut découvrir avec sûreté, même les plus faibles traces d'actions rotatoires.
Dans la dernière phrase de sa Note, M. Mitscherlich dit que la nature, le nombre, l'arrangement et la distance des atomes sont les mêmes dans les deux sels qu'il a comparés. Il conçoit sans doute ici ces atomes dans la signification habituelle que leur donnent les chimistes, comme représentés, au moins proportionnellement, par les équivalents chimiques des divers principes combinés. Les caractères d'identité qu'il leur attribue ainsi dans les deux sels sont conformes aux opinions généralement admises aujourd'hui en chimie.
Mais, malgré la grande autorité que ces idées me paraissent recevoir ici de son assentiment, ou plutôt à cause de l'importance qu'elles tirent de cette autorité même, j'oserais dire, contrairement au sentiment général, que les résultats de l'analyse chimique ne peuvent donner aucune indication sur le mode d'arrangement, non plus que sur le nombre ou la distance relative des corpuscules réellement atomiques qui constituent les corps parce que les conditions qu'on en infère sur ces particularités, dérivent d'une extension inexactement donnée à la notion des masses sensibles, que la chimie reconnaît comme équivalentes dans la généralité des réactions. Si l'on remonte aux expériences par lesquelles on détermine les rapports de ces masses entre elles, ou ce qu'on appelle les poids atomiques, on s'assurera aisément que l'équivalence qu'on y découvre, et par laquelle on les caractérise, s'applique toujours à des effets mécaniques très-complexes, à des résultantes d'action exercées, non par les molécules constituantes individuelles, mais

Matériel supplémentaire

par des systèmes matériels excessivement multiples, dans lesquels ces molécules entrent en quantité innombrable, et dans des positions relatives infiniment diversifiées ; de sorte que les phénomènes ainsi opérés, loin de déceler leurs qualités individuelles manifestent seulement celles d'un ensemble où cette individualité doit s'affaiblir par confusion, sinon entièrement disparaître.

De tels phénomènes ne donnent donc aucune notion qu'on puisse légitimement appliquer aux molécules composantes considérées isolément, en elles-mêmes, pour leur constitution propre, indépendante de leur mode d'agrégation fortuit. Ainsi, toutes les conséquences que l'on voudrait en déduire sur les qualités ou la répartition de ces molécules dans les masses sensibles, comme la généralité des chimistes le fait de nos jours seraient absolument hypothétiques, et sans fondement même vraisemblable. Les propriétés physiques résultantes de l'agrégation de ces masses, comme les vibrations sonorifiques, les formes cristallines et la double réfraction, ne fournissent pas davantage des caractères moléculaires, ou du moins on ne les en a pas, jusqu'à présent, mécaniquement déduits et il semble bien difficile qu'on puisse les tirer de phénomènes aussi complexes. La pesanteur, quoiqu'elle agisse moléculairement, ne saurait non plus nous en fournir, par sa généralité même, puisqu'elle s'exerce, avec une égale énergie, sur les éléments matériels de toute nature, de quelque manière qu'ils soient constitués et agrégés. Les phénomènes capillaires, et ceux de la réfraction ordinaire même, n'ont été, jusqu'à présent, observés et calculés que pour des unités de masse composées d'éléments matériels innombrables, dont la constitution propre n'est point définie ; et peut-être cette constitution n'y intervient-elle que dans une résultante mécanique complexe, si même elle n'y devient pas essentiellement insensible par compensation.

Les seuls phénomènes dont l'observation et les mesures puissent être légitimement rapportées aux groupes moléculaires constituants eux-mêmes, me semblent donc, dans l'état actuel de nos connaissances, consister uniquement dans les déviations qu'un grand nombre de substances, toutes à la vérité d'origine organique, impriment aux plans de polarisation des rayons lumineux, indépendamment de leur état d'agrégation fortuit ; pourvu qu'il ne soit pas de nature à développer des actions optiques capables de rendre celles-là insensibles par leur intervention trop puissante. Car, lorsqu'on a observé ces phénomènes à travers des épaisseurs finies de ces substances, dont les éléments soient à l'état de liquidité, ou dans un état d'agrégation tout à fait confus si l'on réduit la déviation totale à ce qu'elle serait dans les mêmes conditions de température pour la même substance active considérée isolément, agissant sur un même rayon simple, à travers une unité finie d'épaisseur et sous une densité idéale égale à l'unité, on peut prouver mathématiquement que le produit numérique ainsi obtenu est proportionnel à la moyenne des déviations qu'une particule moléculaire unique imprimerait au plan de polarisation du rayon lumineux pris pour type si elle était successivement placée dans toutes les positions imaginables relativement à lui. C'est ce produit que j'ai appelé le pouvoir moléculaire spécifique des corps. L'action dont il résulte étant individuelle, subsiste et s'exerce sans altération, pour l'intensité comme pour le sens, dans toutes les positions relatives que l'on peut faire prendre aux molécules constituantes des masses sensibles, à tous les intervalles que l'on peut établir entre elles en les désagrégeant on en les mêlant avec d'autres substances inactives, et soit qu'on agite la masse qui les renferme ou qu'on la laisse en repos. Ce pouvoir, dans les substances qui le possèdent, ne peut être détruit ou modifié qu'en décomposant leurs groupes moléculaires et en rendant libres les principes qui les constituaient ou en engageant ces groupes mêmes non

Matériel supplémentaire

décomposés dans des combinaisons chimiques avec d'autres substances inactives, de manière à constituer des groupes moléculaires nouveaux. Alors ils communiquent toujours à ceux-ci leur pouvoir propre, plus ou moins modifié. L'individualité de ce pouvoir, et son application aux molécules mêmes, est donc ici manifeste. Maintenant, si les poids atomiques des chimistes, tels qu'ils les calculent, ne sont pas proportionnels aux poids individuels de ces groupes ni aux énergies de leurs actions chimiques individuelles, comme les effets complexes desquels on les déduit me paraissent le prouver manifestement, on ne devra trouver généralement aucune relation, éloignée ou prochaine, entre leurs valeurs numériques et les propriétés réellement moléculaires qui produisent les déviations. C'est aussi ce qui est établi aujourd'hui par une multitude d'expériences. Mais celle que M. Mitscherlich vient de nous communiquer, donne une confirmation précieuse de ce résultat, parce qu'elle le montre dans deux corps entre lesquels il existe d'ailleurs une remarquable communauté, tant de poids atomiques que de toutes les propriétés physiques appartenant aux masses complexes ce qui n'empêche pas l'individualité distincte de leurs molécules constituantes de se manifester, par la propriété qu'elles possèdent d'agir ou de n'agir pas sur les plans de polarisation des rayons lumineux. Or il serait difficile de concevoir mécaniquement que ces molécules dissemblables, étant prises en même nombre, placées à égales distances, et arrangées de la même manière, pussent produire des systèmes matériels, de dimensions sensibles, dont la forme cristalline et les propriétés physiques soient aussi exactement pareilles que dans les deux corps ici comparés; du moins rien ne saurait en donner l'assurance, et le contraire serait plutôt à présumer. »

3. Texte d'Auguste Laurent, 1848 :

« Les recherches que j'ai entreprises sur la chimie organique m'ont conduit, il y a quelques années, à signaler divers rapports qui existent entre la forme cristalline et la composition des corps. Les conclusions auxquelles je suis arrivé, ont été accueillies avec une telle défaveur dans les Annuaires de chimie, et par les minéralogistes, que je crois devoir saisir l'occasion qui m'est offerte par les derniers travaux de M. Pasteur, pour rappeler en peu de mots ce que j'ai publié sur ce sujet, en y joignant quelques faits nouveaux qui peuvent s'y rattacher :

« 1°. J'ai avancé qu'un même corps pouvait avoir deux formes différentes, mais très-voisines l'une de l'autre, et que, sous de très-légères influences, l'une de ces formes pouvait passer à l'autre. J'ai cité, comme exemple, les deux formes du chlorure de naphtaline chlorée, les deux formes de la chaux carbonatée, celles du nitrate de potasse, celles du sulfate de potasse, celles des micas à un et à deux axes, et enfin celles des mésotypes. Ces preuves n'ont pas paru suffisantes mais il ne peut plus rester d'incertitude sur ce sujet depuis que M. Pasteur a fait voir que ma proposition devait s'étendre à toutes les substances isomorphes (sauf le cas d'isomérie).

« 2°. J'ai admis que deux corps différents, mais ayant une composition analogue, peuvent être isomorphes, quand même leurs cristaux appartiennent à des systèmes différents, c'est-à-dire qu'un cube peut être isomorphe avec un rhomboèdre dont les angles sont voisins de 90 degrés, un prisme hexagonal régulier avec un prisme rhomboïdal d'environ 120 degrés, etc.

« J'ai cité, comme exemple, le chlorure de naphtaline C20H16+Cl8 (prisme oblique), et le chlorure de naphtaline chlorée C20H14Cl2 + Cl8 (prisme droit), ainsi que plusieurs autres composés de la même série. On pourrait joindre à cet exemple la scolézite et les mésotypes calcaires et sodiques.

M. Pasteur vient de citer à l'appui de ma proposition de nouveaux exemples empruntés aux divers tartrates.

Matériel supplémentaire

« 3°. J'ai fait voir que des corps qui appartiennent à une même série, mais qui ne renferment pas le même nombre d'équivalents, peuvent être, soit en totalité, soit en partie, isomorphes (ou hémimorphes). J'ai cité comme exemple le chlorure de naphtaline, le chlorure de naphtaline bromée, la naphtaline trinitrée, plusieurs radicaux naphtaliques, plusieurs chlorures naphtaliques, le tungstate sodico-potassique, le tungstate sodique.

M. Pasteur vient de découvrir que tous les tartrates, même lorsqu'ils ne renferment pas le même nombre d'atomes d'eau, offrent des prismes qui ont la même forme, mais dont les sommets sont différents.

Je citerai deux nouveaux exemples d'isomorphisme entre des corps qui sont loin, en apparence, de présenter de l'analogie dans leur constitution ; je veux parler de l'acétate et du butyrate de cuivre d'une part, et, de l'autre, du carbonate de chaux et du nitrate de soude. »

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

Commentaire

A propos de l'article intitulé « Quelle recherche agronomique pour une agriculture durable ? »

André Gallais[1*], Yvette Dattée[2], Bernard Le Buanec[3], Yves Lespinasse[4]

[1] *UMR Génétique Quantitative et Evolution, INRAE-UPS-CNRS, Ferme du Moulon, 91190 Gif-sur-Yvette,* andre.gallais@inrae.fr
[2] *34, rue du Hameau, 75015 Paris,* yvette.dattee@gmail.com
[3] *24, rue Treiz-an-Douric, 29100 Douarnenez,* b.lebuanec@orange.fr
[4] *24, avenue de la Petite Garde, 49240 Avrillé,* yves.lespinasse@yahoo.fr

Correspondance :
andre.gallais@inrae.fr

L'article de Gilles Lemaire *et al.* (*Quelle recherche agronomique pour une agriculture durable ?*, Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France, 2021, 7, 1-18) présente les évolutions nécessaires de la recherche pour une agriculture durable dans trois domaines principaux : l'amélioration des plantes, la santé des plantes et l'agronomie. Nous réagissons sur le paragraphe suivant, relatif à l'amélioration des plantes : « *De la même manière, le paradigme de la génétique, qui était de réunir dans le même individu l'ensemble des allèles favorables et de constituer des peuplements les plus homogènes possibles pour favoriser l'expression de leur potentiel, atteint aujourd'hui ses limites, car il implique une fuite en avant dans l'artificialisation du milieu. Il apparaît sans doute tout aussi intéressant non pas de rassembler les allèles favorables dans le même individu, mais de les insérer au sein de la même population de plantes alors composée d'individus génétiquement différents pouvant interagir et, éventuellement, coopérer pour exploiter au mieux les ressources limitées du milieu (Litrico et Violle, 2019), même si cette voie se révèle complexe à mettre en œuvre.* »

D'abord, si le but de la création variétale est bien de réunir dans une même population reproductible, la variété, le maximum d'allèles favorables, il faut préciser pour quels objectifs de sélection et quelles conditions de culture. Peut-on dire que cette voie atteint aujourd'hui ses limites ? Les auteurs pensent sans doute aux limites de la sélection pour le rendement en conditions intensives, avec recours aux intrants. Cependant, pour une meilleure valorisation des intrants, pour une meilleure exploitation des ressources naturelles du sol, et pour l'adaptation à différents milieux, la variabilité génétique est loin d'avoir été

épuisée, puisqu'elle n'a été que peu, voire pas, exploitée (par exemple pour les caractères liés au système racinaire ou aux interactions plante x micro-organismes de la rhizosphère). De plus, on a aujourd'hui de nouveaux outils pour mieux apprécier et utiliser la variabilité génétique de ces caractères.

Ce but entraînerait-il une fuite en avant avec l'artificialisation du milieu ? L'artificialisation du milieu de culture, c'est notamment l'apport d'intrants. Or les résultats expérimentaux montrent que, en moyenne, les variétés récentes sont aussi adaptées à de faibles niveaux d'intrants, même si la meilleure variété à forts niveaux d'intrants ne serait pas nécessairement la meilleure à faibles niveaux d'intrants, mais ne serait pas la plus mauvaise. Ainsi les variétés récentes sont plus rustiques que les variétés anciennes : pour une même productivité, elles demandent moins d'artificialisation du milieu (Gallais, 2015 ; Le Buanec, 2018). De plus, chez le blé, depuis 25-30 ans, le progrès génétique a continué malgré une diminution des intrants (N + fongicides) et un effet négatif du changement climatique, évitant ainsi une régression des rendements.

Enfin serait-il tout aussi intéressant de rassembler les allèles favorables dans une même population de plantes composée d'individus génétiquement hétérogènes ? Remarquons d'abord que c'est bien la réduction de la base génétique des variétés, souvent à un génotype (lignée, hybride simple, clone), qui a permis d'utiliser au mieux la variabilité génétique de différents caractères. Cette homogénéité permet de définir des techniques culturales plus précises (intervention au bon stade, ce qui n'est pas possible avec un mélange de génotypes). Serait-il plus justifié de travailler au niveau de populations de plantes ?

Les résultats expérimentaux montrent que, du point de vue de la productivité, les meilleures populations hétérogènes sont moins productives que les meilleures populations homogènes et que, comparées aux variétés modernes homogènes, elles ne sont pas plus stables selon le milieu. Les variétés modernes contiennent en effet dans leur génome des gènes d'adaptation à différents milieux et, s'ils sont dispersés dans différentes plantes, cela conduit à une perte de productivité (Gallais, 2015).

Cependant, dans certaines situations, des associations de génotypes peuvent être intéressantes à cultiver. C'est le cas chez le blé, où la culture en mélange de quelques variétés résistantes à différentes races de rouilles peut stabiliser certaines résistances et, au stade final, économiser des pesticides, mais il s'agit d'associer quelques génotypes choisis pour leurs aptitudes à l'association. Les études déjà réalisées sur diverses espèces annuelles montrent que les situations de coopération entre génotypes d'une même espèce sont rares ; en revanche, les situations de complémentation entre génotypes d'espèces différentes (comme entre graminées et légumineuses) sont plus fréquentes.

Dans tous les cas, il faudra sélectionner les génotypes pour leurs aptitudes à l'association. Finalement ce sont des variétés homogènes qui seront associées, ce qui ne remet pas en cause le « paradigme de la sélection » : il s'agit toujours de sélectionner des variétés homogènes réunissant dans leur génome le maximum de gènes d'adaptation à leurs conditions de culture.

Références

Gallais A. 2015. *Comprendre l'amélioration des plantes, Enjeux, méthodes et critères de sélection*. Éditions Quae, Paris.

Le Buanec B. 2018. *La diversité génétique en agriculture*. In Regnault Roger C (dir) *Idées reçues et agriculture, paroles à la science*, Éditions Presses des Mines.

Litrico I, Violle C. 2015. *Diversity in plant breeding: a new conceptual framework, Trends in Plant Science*, 20, 604-613.

Commentaire

Edité par
Nadine Vivier, professeur émérite des universités de l'université du Maine (Histoire contemporaine), membre de l'Académie d'agriculture de France.

Rapporteurs
Noëlle Dorion, membre de l'Académie d'agriculture de France.

Resté anonyme.

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

Reçu
15 octobre 2021

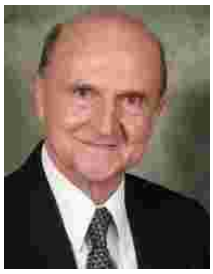
Accepté
28 novembre 2021

Publié
17 décembre 2021

Citation
Gallais A, Dattée Y, Le Buanec B, Lespinasse Y. 2021. A propos de l'article *Quelle recherche agronomique pour une agriculture durable ?, Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF)*, 12(4), 1-3. https://doi.org/10.58630/pubac.not.a493576.

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

Yvette Dattée est directeur de recherche honoraire de l'INRA, ancienne directrice du GEVES, membre de l'Académie d'agriculture de France.



Bernard Le Buanec est ancien directeur des programmes de recherche du groupe Limagrain, membre de l'Académie d'agriculture de France.

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

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

Réponse à Commentaire

Réponse des auteurs

Gilles Lemaire [1]*, Jean-François Briat [2], Michel Dron [3]

[1] *12, rue Virecourt, 79500, Melle, 06-70-81-80-08, gilles.lemaire.inra@gmail.com*
[2] *116, rue de la Grange 34980, St Clément-de-Rivière, 06-51-46-94-51, jfbriat@free.fr*
[3] *21, avenue Burre-Cottage, 91440, Bures-sur-Yvette, 06-46-75-85-75, michel.dron@u-psud.fr*

Correspondance :
gilles.lemaire.inra@gmail.com

Les commentaires concernant notre article *Quelle recherche agronomique pour une agriculture durable ?*, adressés par Gallais *et al.*, visent essentiellement des aspects de méthodologie de sélection concernant l'intérêt ou non d'augmenter la variabilité intra-population en associant des génotypes différents au sein d'une même culture. Le débat sur cette question reste ouvert entre généticiens.

Notre propos n'était pas de prendre parti sur l'efficacité d'une telle méthodologie, mais seulement de nous interroger sur la possibilité ainsi offerte d'augmenter la gamme d'adaptation des systèmes de culture à leur milieu. En effet, c'est bien par rapport à des objectifs de sélection parfaitement spécifiés que l'on peut juger de l'efficacité d'un progrès génétique. Comme le précisent les auteurs du commentaire : « *Les auteurs* [de la note] *pensent sans doute aux limites de la sélection pour le rendement en conditions intensives, avec recours aux intrants* ». C'est effectivement ce à quoi nous pensions, et il s'agit donc bien d'objectifs et non de méthodes.

Concernant les ressources pour la nutrition minérale des cultures, azote et phosphore en particulier, mais aussi les micro- et oligo-nutriments, ainsi que la ressource en eau, il est clair que l'augmentation des seules capacités de production en conditions non limitantes (rendement potentiel Y_{max}) implique une demande accrue pour les ressources mises à la disposition de la culture.

Cet objectif unique ne s'accompagne pas *a priori* d'un progrès génétique concomitant de la capacité de la culture à mieux exploiter les ressources endogènes N et P (et autres minéraux indispensables…) du sol.

Par voie de conséquence une augmentation importante des apports fertilisants N et P devient *de facto* obligatoire. Comme le montrent Tilman *et al.* (2002), le résultat de telles pratiques, ces 50 dernières années au niveau mondial, a été une augmentation par 2, en moyenne, des rendements des principales espèces cultivées mais dans le même temps les apports de fertilisants N et P ont été multipliés par 7 et 3,5 respectivement.

Or ce sont bien ces apports de fertilisants qui sont à la source des émissions de N et P dans

l'environnement. Nous maintenons donc, bien évidemment, que ce progrès génétique ayant l'augmentation de Y_{max} comme seul horizon « *est une fuite en avant dans l'artificialisation du milieu* ».

Bien sûr, il reste l'argument, maintes fois répété, que les variétés « modernes » permettent des augmentations de rendement même en conditions limitantes en N, P et en eau. Tout à fait d'accord ! Cela est simplement dû au fait que les capacités de prélèvement des ressources du sol (N, P) par les plantes sont rétro-régulées par leur capacité de croissance potentielle (Briat *et al.*, 2020). En améliorant celle-ci, on augmente celles-là, d'où la persistance d'un progrès génétique qui continue de s'exprimer de manière très atténuée, même en situations limitantes.

Ce progrès n'étant pas associé à un progrès équivalent sur la capacité « intrinsèque » des plantes à prélever leurs ressources dans un milieu limitant, c'est-à-dire à biomasse produite similaire, il s'accompagne d'une variabilité accrue face aux aléas des conditions de milieu rendant les systèmes de culture peu prévisibles et difficilement gérables. Ainsi le progrès réalisé sur la demande en N-P (et autres éléments) des cultures, obtenu par une sélection sur leur potentiel de rendement en conditions non limitantes, doit être accompagné d'un progrès au moins équivalent sur l'offre. Cela pourrait être atteint par la sélection de traits racinaires qui permettraient une augmentation de leur efficacité pour prospecter et utiliser les ressources endogènes du sol. Sur ce point nous sommes en parfait accord avec la réponse de Gallais *et al.* qui écrivent : « *Cependant, pour une meilleure valorisation des intrants, pour une meilleure exploitation des ressources naturelles du sol, et pour l'adaptation à différents milieux, la variabilité génétique est loin d'avoir été épuisée, puisqu'elle n'a été que peu, voire pas, exploitée (par exemple pour les caractères liés au système racinaire ou aux interactions plante x micro-organismes de la rhizosphère). De plus, on a aujourd'hui de nouveaux outils pour mieux apprécier et utiliser la variabilité génétique de ces caractères.* »

En effet, nous écrivions dans notre article: « *Il y a une variabilité génétique non ou insuffisamment exploitée, dans la capacité des espèces à tirer parti de leur milieu en conditions limitantes et à interagir sur celui-ci par l'intermédiaire du microbiome rhizosphérique pour augmenter la disponibilité des ressources du sol à leur profit* (Fitzpatrick *et al.*, 2018 ; Briat *et al.*, 2020). *L'exploitation de cette variabilité devrait être la base d'une augmentation de production sans augmentation d'intrants, même si la complexité d'une sélection végétale sur de tels critères peut paraître un frein a priori. Mais, là encore, de nouveaux progrès dans les outils de génomique peuvent ouvrir des voies nouvelles.* » La nécessité d'une sélection des traits racinaires évoquée ci-dessus est donc indispensable, sinon le déséquilibre entre la demande et l'offre impliquera l'augmentation continue et illimitée des apports de fertilisants N et P, qui sont la source des impacts environnementaux de l'agriculture.

Que cette meilleure exploration et utilisation des ressources du sol, nutriments minéraux et eau puisse faire l'objet d'un effort de sélection spécifique et aussi puissant que celui entrepris pour augmenter les rendements potentiels est une nécessité. La question qui mérite d'être posée est de savoir comment y parvenir au mieux, ce qui inclut l'augmentation de la diversité intra-variétale afin d'associer des architectures racinaires complémentaires. Même si nous acceptons que des arguments méthodologiques d'efficacité de la sélection viennent tempérer cette perspective.

Faut-il d'abord sélectionner des génotypes, puis les associer pour mieux exploiter les ressources du milieu, ou bien directement sélectionner des mélanges ? Ce choix est affaire d'efficacité de la sélection et, sur ce point, nous reconnaissons atteindre la limite de nos compétences et acceptons donc la critique. Toutefois nos collègues devraient pouvoir admettre qu'une sélection en milieu non limitant ne peut pas, comme par miracle, adapter les plantes pour extraire leurs ressources en conditions limitantes.

Réponse à Commentaire

Références

Briat JF, Gojon A, Rouached H, Plassard C, Lemaire G. 2020. Reappraisal of the concept of nutrient availability for plants in soils at the light of the recent molecular physiology advances, European *Journal of Agronomy,* 116 (doi.org/10.1016/j.eja.2020.126069).

Fitzpatrick CR, Copeland J, Wang PW, Guttman DS. Kotanen PM, Johnson MTJ. 2018. *Assembly and ecological function of the root microbiome across angiosperm plant species. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* 115 (6), E1157-E1165.

Tilman D, Cassman KG, Matson PA, Naylor R, Polasky S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices, *Nature*, 418 (6898), 671–677.

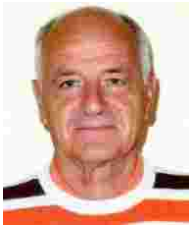
Rubrique
Cet article a été publié dans la rubrique « Réponse à Commentaire » des *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France.*

Reçu
15 octobre 2021

Accepté
28 novembre 2021

Publié
17 décembre 2021

Citation
Lemaire G, Briat JY, Dron M. 2021. Réponse au Commentaire *À propos de l'article intitulé « Quelle recherche agronomique pour une agriculture durable ? », Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF),* 12(5), 1-3. https://doi.org/10.58630/pubac.not.a924010/



Gille Lemaire est directeur de recherche honoraire INRA. Il a conduit des recherches sur l'écologie des prairies, la fertilisation des cultures et l'association entre agriculture et élevage. Il est membre de l'Académie d'agriculture de France.

Jean-François Briat est directeur de recherche honoraire au CNRS. Il a conduit des recherches de physiologie moléculaire pour caractériser les mécanismes d'adaptation des plantes liés aux contraintes de leur nutrition minérale (carences ou excès). Il est membre de l'Académie d'agriculture de France.

Michel Dron est professeur émérite de biologie végétale de l'Université Paris-Saclay. Il a conduit des recherches sur la génétique de la défense des plantes vis-à-vis des maladies. Il est membre de l'Académie d'agriculture de France.

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France

ACADÉMIE d'AGRICULTURE de FRANCE

AGRICULTURE ■ ALIMENTATION ■ ENVIRONNEMENT