

Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France

Academic Notes of the French Academy of agriculture

Authors

Gilles LEMAIRE, Michel DRON, Jean-François BRIAT

Title of the work


Quelle recherche agronomique pour une agriculture durable ?

Year 2021, Volume 12, Number 1, pp. 1-18

Published online:

16 September 2021,

<https://www.academie-agriculture.fr/publications/notes-academiques/n3af-opinion-quelle-recherche-agronomique-pour-une-agriculture>

[Quelle recherche agronomique pour une agriculture durable ?](#) © 2021 by Gilles LEMAIRE, Michel DRON, Jean-François BRIAT André GALLAIS is licensed under [Attribution 4.0 International](#) 



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 XVI^e 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) :

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

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

culturelles 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 culturelles 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 culturelles (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 (Aufroy *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 progressivement, au fur et à mesure de l'avancement des connaissances grâce à une « interdisciplinarité » 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-système » 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 multifonctionnalité 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 multifonctionnelle, 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-culturelle/strategie-technique-culturelle/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 (efficacité de la photosynthèse, efficacité de l'azote, efficacité 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 (Litrice et Violle, 2019), même si cette voie se révèle complexe à mettre en œuvre. 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 XVII^e 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, phosphore (C, N, P)... , diversification des rotations et assolements, dynamique des matières organiques des sols, contrôle des maladies, parasites et adventices (Franzluebbers 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 culturelles 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 biogéochimie... 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 Sebillothe (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 (Sebillothe, 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-fourriture) 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

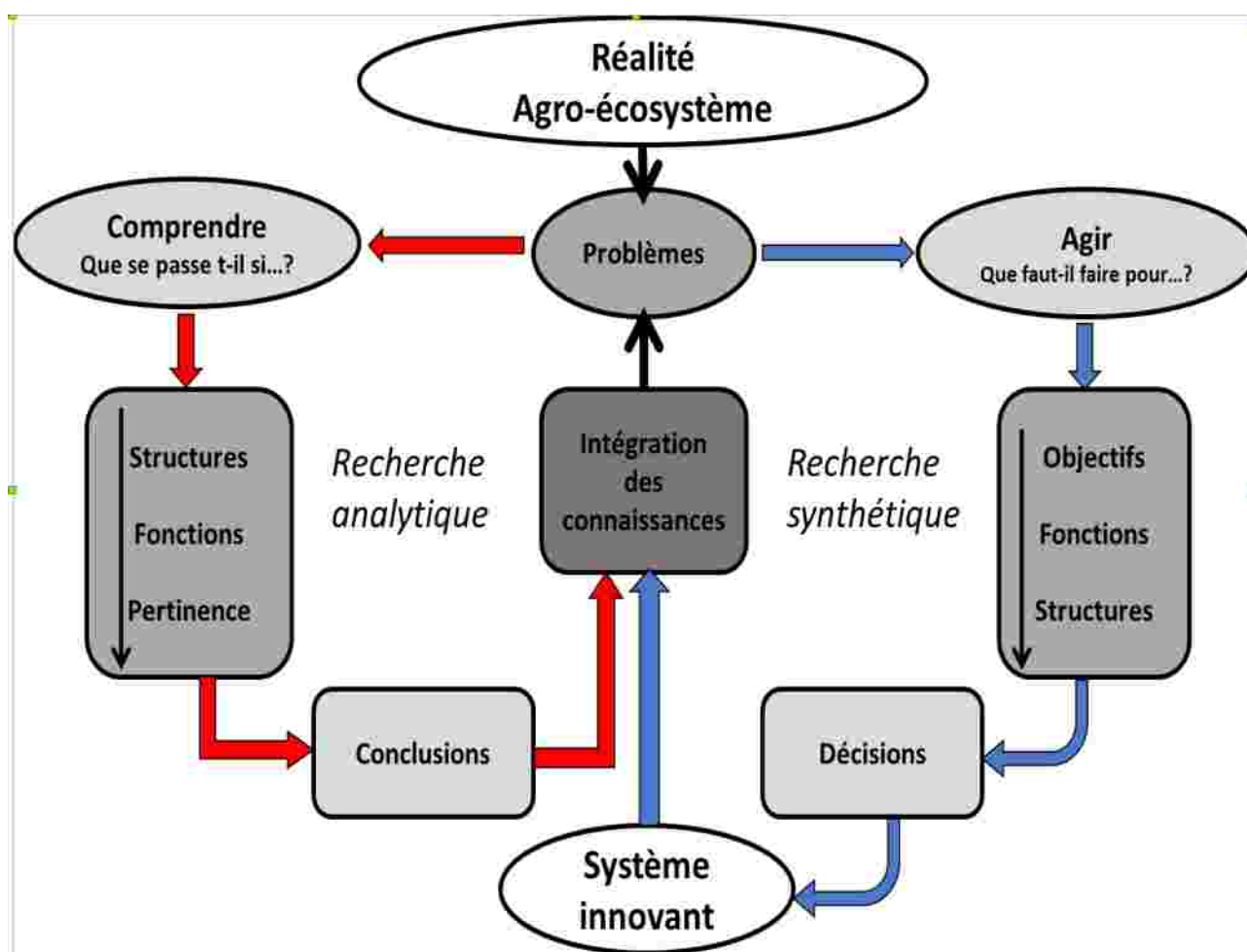


Figure 2. Distinction schématique entre la recherche analytique « pour comprendre » (analysis-oriented research) et la recherche synthétique « pour agir » (design-oriented research) pour l'étude des agro-écosystèmes. Ces deux types de recherche doivent partir d'une analyse commune et partagée des problèmes 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 on 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

Point de vue

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-écosystèmes : *analysis-oriented*, *design-oriented and implementation-oriented*, traitant de la problématique *agriculture, food production and nature conservation*. Ces trois domaines représentaient respectivement 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'efficacité 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 Ecology 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.

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

- 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, 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.
- Franzluebbers 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, Elsevier, Oxford (UK), 109-122.
- Fresco LO. 1984. *Comparing anglophone and francophone approaches to farming systems research and extension*, Networking Paper 1, F.S.S.P. Institute of Food Agricultural Science, University of Florida, Gainesville, <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, Franzluebbers 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*

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

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, Tittone 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, Tschamtké T, Weisser W, Winqvist C, Woltz M. 2016. Agricultural Landscape simplification reduces natural pest control: a quantitative synthesis, *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 221, 198-204.

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

- 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, Elsevier, 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 world 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

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

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

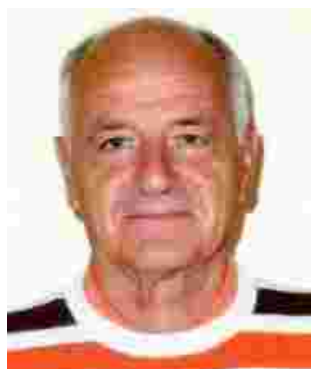
5 septembre 2021

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.